



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Delimitación de estratos finos usando atributos sísmicos en datos post inversión espectral

Jorge Iván Ramírez Sanabria

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia
2017

Delimitación de estratos finos usando atributos sísmicos en datos post inversión espectral

Jorge Iván Ramírez Sanabria

Anteproyecto de la Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial
para optar al título de:

Magister en Ciencias Geofísica

Director (a):

Prof. Dr. Luis Alfredo Montes Vides

Línea de Investigación:

Geofísica

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias

Bogotá, Colombia

2017

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mi madre Gloria, que siempre ha creído en mí.

A mis hermanos Natalia y Sergio, por quienes siempre luchare y tratare de orientar.

A mis amigos y compañeros de trabajo que siempre me apoyaron con sus conocimientos.

A todas aquellas personas que siempre me apoyaron con su ánimo y entusiasmo.

Agradecimientos

Quiero agradecer de manera sincera a mi director de tesis Luis Montes Vides, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo, también agradezco a la empresa Pacific Exploration & Production por el acceso a los datos técnicos que se utilizaron en este trabajo.

Agradezco a mis compañeros de trabajo y amigos Oscar Castillo, Efrain Laverde, Mario Di Lucca, Antonio Pico, Diego Morales, Nilson Delgado y todos aquellos que siempre me brindaron su invaluable ayuda.

Finalmente agradezco a la Universidad Nacional de Colombia por brindarme la oportunidad de pertenecer a esta entidad y formarme académicamente.

Resumen

El presente trabajo implementó una inversión espectral basada en un algoritmo genético en datos sintéticos y datos reales, para mejorar la resolución vertical de los datos sísmicos y determinar el espesor de los estratos finos. También se construyó un algoritmo de interpolación basada en lógica difusa para mejorar la resolución lateral y obtener una imagen sísmica de mayor detalle para la interpretación geológica. La inversión espectral y el algoritmo de interpolación fueron probados en un sub-volumen sísmico de la región sur occidental de la cuenca de los Llanos de Colombia. Para la caracterización del miembro informal C7 de la formación Carbonera se utilizaron atributos sísmicos como varianza, amplitud RMS y “Sweetness”, los cuales fueron útiles para realzar canales y evaluar los resultados obtenidos de los algoritmos implementados en esta investigación.

Palabras clave: Atributos sísmicos, Inversión Espectral, Algoritmos Genéticos (AG), lógica difusa.

Abstract

The present study implemented a spectral inversion based on a genetic algorithm to synthetic data and real data, for improving the vertical resolution of the seismic data and to calculate the thickness of the thin bed. Also it has been made an algorithm based on fuzzy logic to enhance the spatial resolution in seismic data and to obtain images seismic to appropriate to geologic interpretation. The spectral inversion and the algorithm of interpolation were proved in a seismic selection of the region south west in the Colombian llanos basin. For the characterization of the informal member C7 in the Carbonera formation, attributes seismic were used like variance, RMS amplitude and sweetness, which they were useful to highlight edges of the channels and other structural and stratigraphic features, and finally to evaluate the results of the algorithms implemented in this investigation.

Keywords: Seismic attributes, Seismic Inversion, Genetic Algorithm (GA), fuzzy logic.

CONTENIDO

Introducción	15
1. Generalidades	17
1.1 Localización del área de estudio	17
2. Marco Geológico.	19
2.1 Geología regional.....	19
2.2 Geología estructural.....	19
2.3 Estratigrafía regional.....	20
2.3 Estratigrafía local	23
3. Marco Teórico.....	25
3.1 Definición de estratos finos	25
3.2 Descomposición espectral	26
3.3 Inversión espectral.....	28
3.4 Algoritmo Genético.....	30
3.5 Lógica Difusa	32
3.6 Atributos Sísmicos	34
4. Metodología.....	37
4.1 Análisis de la información	38
4.2 Implementación de la inversión espectral.	43
4.2.1 Modelos sintéticos.	43
4.2.2 Datos reales.	44
4.3 Algoritmo genético aplicado en la inversión espectral.	46
4.4 Interpolación basada en lógica difusa aplicada en sísmica.	48
4.5 Cálculo de atributos sísmicos	53
5. Discusión de resultados.	55
5.1 Modelos sintéticos.....	55
5.2 Datos reales - Formación Carbonera.....	58
5.3 Interpolación basada en lógica difusa – Formación Carbonera.....	66
5.4 Atributos sísmicos.....	70
6. Conclusiones.....	75
A. Anexo: Código en Matlab inversión espectral	77
B. Anexo: Código en Matlab interpolación basada en lógica difusa.....	83
Bibliografía.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Localización general del área de estudio.	17
Figura 2-1: Columna estratigráfica generalizada de la cuenca de los llanos.	21
Figura 2-2: Registro tipo (Pozo A) para el área de estudio.	24
Figura 3-1: Modelo de cuña para tres capas.	25
Figura 3-2: Transformada de Fourier en una ventana larga.	26
Figura 3-3: Transformada de Fourier para una ventana corta.	27
Figura 3-4: Descomposición de una serie de reflectividad en su parte par e impar.	28
Figura 3-5: Algoritmo Genético utilizado en la inversión espectral.	31
Figura 3-6: Lógica clásica versus lógica difusa.	32
Figura 4-1: Metodología Utilizada.	37
Figura 4-2: Evaluación petrofísica pozo A.	39
Figura 4-3: Evaluación petrofísica pozo B.	40
Figura 4-4: Espectro de amplitudes del sub-volumen extraído.	41
Figura 4-5: Correlación litoestratigráfica de Pozos A y B.	42
Figura 4-6: Propiedades del modelo sintético 1.	43
Figura 4-7: Propiedades del modelo sintético 2.	44
Figura 4-8: Ventana de análisis de datos sísmicos.	45
Figura 4-9: Ondícula extraída de datos reales vs ondícula Ricker 85 Hz.	46
Figura 4-10: Histograma coeficientes de reflexión Pozo A y B.	47
Figura 4-11: Metodología de la interpolación basada en lógica difusa.	49
Figura 4-12: Esquema para el cálculo del mapa de dirección en la cual la diferencia es mínima.	49
Figura 4-13: Metodología de interpolación de imágenes sísmicas.	51
Figura 4-14: Mapa diferencia mínima.	52
Figura 4-15: Funciones de pertenencia y Reglas de interpolación.	53
Figura 5-1: Resultados para el Modelo 1.	56

Figura 5-2: Resultados para el Modelo 2.....	57
Figura 5-3: Inversión espectral para una traza en el sub-volumen extraído.....	58
Figura 5-5: Resultados de la inversión espectral en la Xline 600.....	60
Figura 5-6: Análisis espectral de la Inline 708	61
Figura 5-7: Resultados de la inversión espectral para trazas vecinas al Pozo-A.....	62
Figura 5-8: Resultados de la inversión espectral para trazas vecinas al Pozo-B.....	63
Figura 5-9: Mapas de amplitudes a 864 ms.	64
Figura 5-10: Mapas de amplitudes a 876 ms.	65
Figura 5-11: Interpolación aplicada a una imagen satelital.	66
Figura 5-12: Error del algoritmo de interpolación.	67
Figura 5-13: Mapas de amplitud para un tiempo de 876 ms.	68
Figura 5-14: Mapa de amplitudes a 864 ms, Original vs Resultado.	69
Figura 5-15: Mapas de los atributos para el cubo interpolado de la inversión espectral para un tiempo de 864 ms.	70
Figura 5-16: Mapas del atributo amplitud RMS en un tiempo de 902 ms.....	71
Figura 5-17: Mapas del atributo Sweetness para un tiempo de 902 ms.	72
Figura 5-18: Interpretación geomorfológica del área.....	73

TABLAS

Tabla 4-1. Variables utilizadas en el AG para el Modelo 1	46
Tabla 4-2. Variables utilizadas en el AG para el Modelo 2.....	47
Tabla 4-3. Variables utilizadas en el AG para datos reales.....	48
Tabla 4-4. Resumen estadístico del mapa de diferencias.....	52
Tabla 5-1. Resultados del AG en la inversión espectral para el Modelo 1	55
Tabla 5-2. Resultados del AG en la inversión espectral para el Modelo 2	56

Introducción

La caracterización de reservorios es un factor determinante en los campos productores de hidrocarburos, aspectos como la estratigrafía son relevantes para la ubicación de pozos productores y exploratorios en una cuenca como lo es la cuenca de los llanos orientales de Colombia, por lo tanto surge la necesidad de implementar técnicas geofísicas que permitan caracterizar la estratigrafía del yacimiento. Una forma de hacer esto es aumentar la resolución sísmica vertical y lateral para reducir la certeza de la continuidad de las arenas que contienen el hidrocarburo y delimitar el yacimiento a explotar.

Por el motivo anteriormente expuesto se propone implementar un algoritmo de interpolación basado en lógica difusa para mejorar la resolución lateral de datos sísmicos e implementar un algoritmo genético (AG) en una inversión espectral para mejorar la resolución vertical de los datos sísmicos, realizando las siguientes actividades:

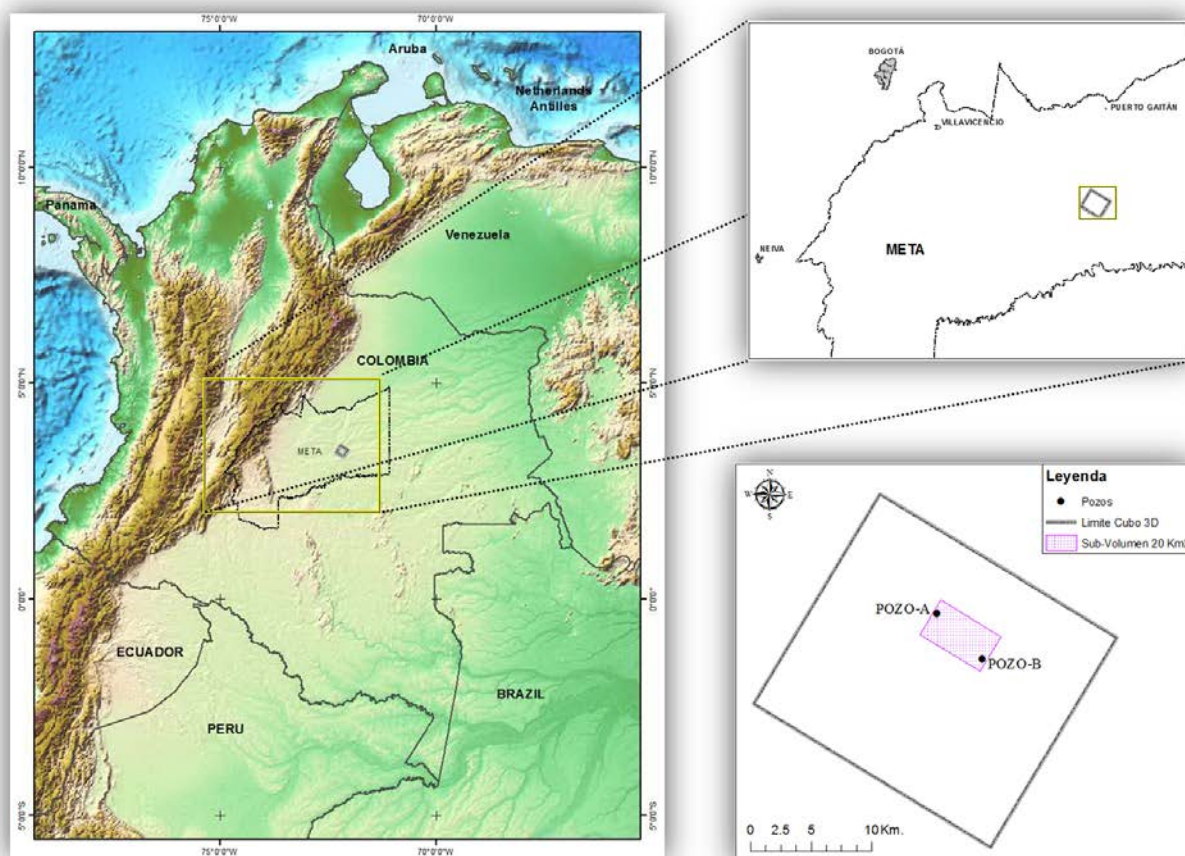
- Desarrollar en MATLAB un algoritmo genético que optimice la inversión espectral.
- Realizar pruebas al desempeño del algoritmo genético en la inversión espectral con modelos sintéticos, utilizando varias ondículas en datos reales y topes de formaciones.
- Desarrollar en MATLAB un algoritmo de interpolación basado en lógica difusa aplicado a datos sísmicos.
- Realizar pruebas en el algoritmo de interpolación usando imágenes digitales de alta resolución para evaluar la funcionalidad del algoritmo de interpolación.
- Visualizar mapas en tiempo de los atributos sísmicos varianza, amplitud RMS y Sweetness que muestren las diferencias y el aumento de resolución en los datos sísmicos.

1. Generalidades

1.1 Localización del área de estudio

El área estudio se encuentra localizada en el Departamento Meta, a 110 Km de la ciudad de Bogotá, a 80 km al sur este de la ciudad de Villavicencio y a 50 km al sur de la cabecera municipal de Puerto Gaitán. El área se encuentra ubicada geológicamente en el centro de la cuenca de los llanos orientales y como se muestra en la parte inferior derecha de la figura 1-1, está delimitada por un sub-volumen sísmico de 20 Km², la topografía dominante en el área es plana con presencia de quebradas y morichales, lo cual puede influir en la calidad de los datos sísmicos por su dificultad de mantener un diseño sísmico totalmente ortogonal.

Figura 1-1: Localización general del área de estudio.



Los datos sísmicos 3D fueron adquiridos en el año 2012 por la empresa Pacific E&P, con un diseño ortogonal, compuesto por 115 líneas receptoras orientadas 31 grados, espaciadas cada 200 metros, la separación de los receptores fue de 40 m (RI: Distancia entre receptores).

Las líneas receptoras tienen una orientación de 301 grados y una separación entre sí de 360 m. Los disparos se ubicaron cada 40 metros (SI: Distancia entre disparos) en las 57 líneas de disparo que se hicieron en la adquisición.

El área total de adquisición fue de 366 Km², con un total de 25516 disparos y 46281 receptores, el objetivo del levantamiento se encuentra en la formación carbonera entre 2700 ft y 3500 ft, el tiempo de grabación fue de 6 segundos, con una tasa de muestreo de 2 milisegundos (ms) y un tamaño de BIN (área sobre la cual las trazas son apiladas) de 20 m. de ancho por 20 m. de largo.

El procesamiento de los datos se realizó en el año 2013, en el cual se obtuvo un cubo de datos Post-Stack sin filtros ni ganancias a los datos de amplitud de la traza, usando un campo de velocidades conocidos para el área de los llanos.

Por otra parte, en el área de adquisición sísmica se perforaron alrededor de 10 pozos exploratorios, de los cuales se tuvo acceso a la información de dos pozos para el área seleccionada en este trabajo.

Los pozos utilizados en este trabajo cuentan con información de curvas de densidad, resistividad y Gamma Ray, para la formación León y la formación Carbonera, adicionalmente se tiene la información de velocidad para el intervalo comprendido por el miembro informal C7 de la formación Carbonera.

2.Marco Geológico.

2.1 Geología regional

La cuenca de los llanos orientales es una cuenca antepaís que se extiende desde el cabalgamiento frontal de la cordillera oriental de Colombia hasta los afloramientos Precámbricos del Escudo Guayanés (Río Orinoco-Guaviare) al este; se trata de una cuenca asimétrica tipo “foreland” o antepaís que cubre un área de cerca de 200.000 km² y que tiene un sistema dinámico cuyos sistemas depositacionales migran en respuesta a cambios en los patrones de deformación, relleno de cuenca y rebote de la litosfera (Bayona et al., 2007). Desde el Triásico hasta el Mioceno Medio, los Llanos Orientales formaron parte de una cuenca sedimentaria aún mayor, que incluía las actuales áreas correspondientes al Valle del Magdalena y Cordillera Oriental. A partir del Mioceno, los Llanos Orientales se separaron formando una cuenca independiente tipo “foreland”, después de la formación de la Cordillera Oriental (Cooper et al., 1995; Casero et al., 1997). La secuencia sedimentaria de edad Paleozoica-Pleistoceno sobrepasa los 25000 pies en proximidades de la Cordillera Oriental y disminuye progresivamente en dirección este-sureste donde alcanza de 2000 pies a 3000 pies aproximadamente. En el área de estudio la secuencia estratigráfica está constituida por rocas del Precámbrico, Paleozoico y Terciario (formaciones Carbonera, León, Guayabo y Necesidad) separadas por discordancias regionales.

2.2 Geología estructural

La cuenca de los llanos está limitada por el escudo de Guyana al este y por el sistema de fallas de Guaicaramo al oeste, incluye una cuña de depósitos Cenozoicos que se hacen más delgados en la parte este de la cuenca (Bayona et al., 2008). Durante el Triásico, Jurásico y el Cretácico temprano, Colombia quizás fue afectada por movimientos tectónicos grandes relacionados a la separación de norte y suramérica en el Proto-Caribe (Cooper et al., 1995). Estos movimientos de la corteza influyeron en la formación de la cuenca de los llanos ya que la misma ha tenido varias configuraciones para convertirse en la cuenca antepaís que es hoy en día.

Durante la transición del Cretácico al Paleoceno la principal deformación dió origen a la acreción de la cordillera occidental, cambiando los ambientes de deposición de la cordillera oriental y la cuenca de los llanos, esto explica el aporte de depósitos marinos en la cuenca de los llanos y algunos aportes fluviales provenientes de la parte oeste de la cuenca (Cooper et al., 1995).

Durante el Eoceno al Oligoceno se reactivaron fallas en el valle inferior del Magdalena las cuales no causaron deformaciones importantes en la cuenca de los llanos, luego en el Oligoceno y Mioceno, el continuo levantamiento de la cordillera oriental generó espacio de

acomodación en la parte distal de la cuenca de los llanos, reactivación de fallas y la migración hacia el este del alto flexural (Bayona et al., 2008), esta reactivación de fallas pre-Cenozoicas en la parte distal de la cuenca de los llanos pudo controlar localmente la migración de hidrocarburos creando compartimentalización de algunos de los más importantes yacimientos de la cuenca de los llanos orientales.

El pulso más fuerte de deformación que ocurrió en la cordillera oriental y que impactó la cuenca de los llanos, ocurrió durante el Mioceno Medio - Tardío, condicionó una depositación aluvial a fluvial en la cuenca de los llanos registrada en la formación Guayabo (Bayona et al., 2008), la cual contiene depósitos que se erosionaron en la cordillera oriental. La deformación y crecimiento de la cordillera Oriental aún sigue activa causando periódicamente algunos movimientos telúricos en la parte oeste de la cuenca y algunos movimientos en la parte central de la cuenca.

2.3 Estratigrafía regional

Los estratos sedimentarios de la cuenca de los llanos comprenden una amplia porción del Phanerozoico, desde el Cámbrico-Ordovícico hasta el pleistoceno (Sarmiento et al., 2011). La cuenca está comprendida por una columna de rocas sedimentarias desde edad Paleozoico, pasando por el Cretácico hasta el Neógeno como se muestra en la Figura 2-1.

Sedimentación del Paleozoico.

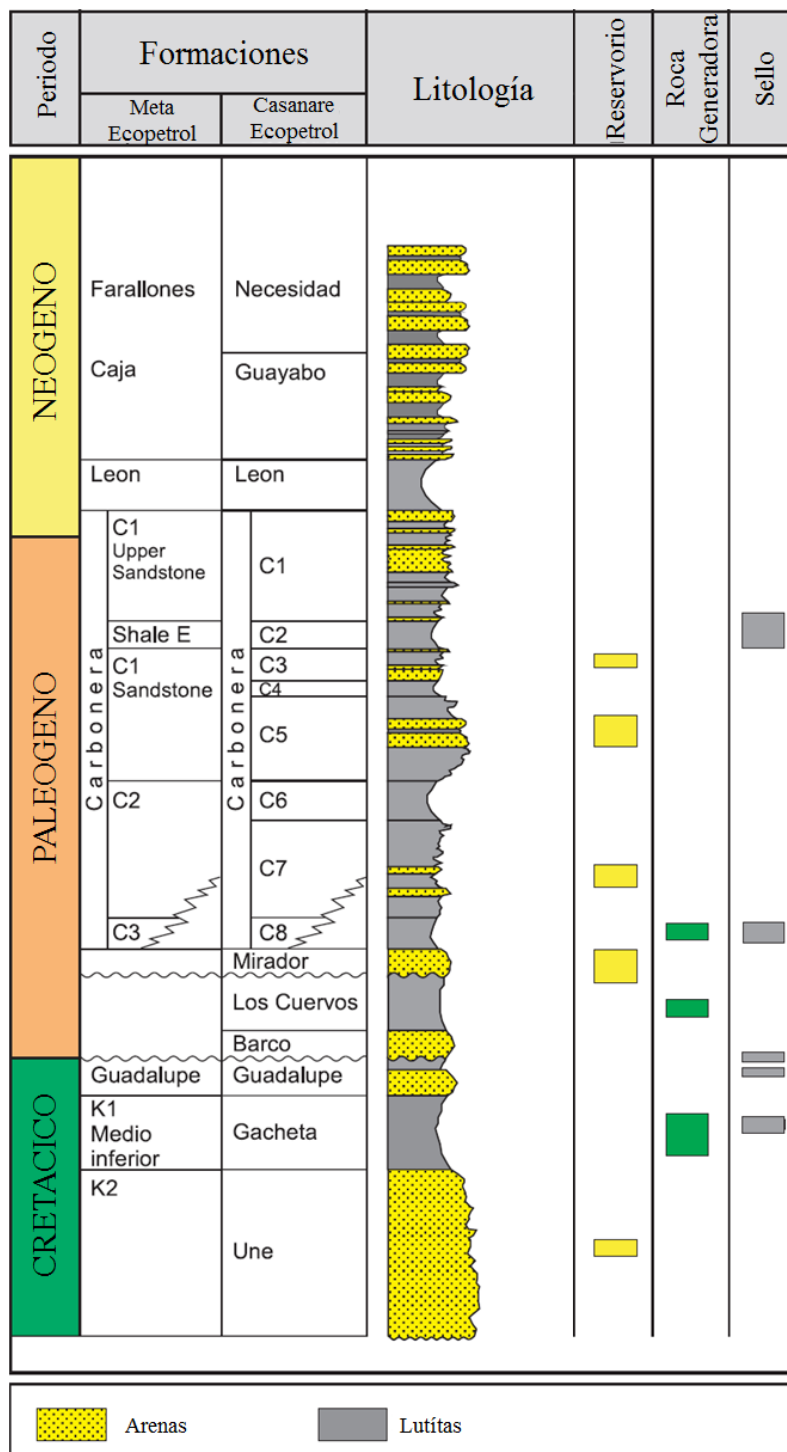
Durante el Paleozoico, sedimentos clásticos fueron depositados directamente sobre el basamento cristalino, algunos de edad del Cámbrico a Ordovícico ubicados en el graven de Arauca, otros sedimentos similares del pozo la Heliera-1 en la misma región pueden ser de edad Cámbrico-Ordovícico. En el pozo Santiago-1 análisis de corazones muestran la presencia de chitinozoarios a los que se les atribuye una edad Ordovícico Tardío. En el pozo Trinidad-1 se reportaron acritarcos y chitinozoarios a los que se asigna una edad Ordovícico Tardío.

Sedimentación del Mesozoico.

Varios reportes de rocas sedimentarias correspondientes al triásico y jurásico se encontraron en el este de la cuenca en el pozo Arauquita-1, donde se dataron sedimentos correspondientes a una edad de 204 a 206 Ma., los cuales indican que para la edad del jurásico había un sistema extensional local (Sarmiento et al., 2011).

Los datos sísmicos en el área muestran baja energía en sus amplitudes, también algunas discordancias y terminaciones en “onlap” sobre las mismas.

Figura 2-1: Columna estratigráfica generalizada de la cuenca de los llanos.
(Modificado de Barrero et al., 2007)



En el periodo del Cretácico tardío cuando el nivel del mar global estaba subiendo, la parte oeste de la cuenca de los llanos se encontraba inundada, dando origen a los sedimentos que formaron la formación UNE, los cuales eran principalmente de tipo marino. Por otra parte, en el costado oriental de la cuenca, había otro tipo de ambientes sedimentarios dominado por ambientes fluviales, deltaicos y estuarinos, en los cuales había incremento de materia orgánica que dio origen a la formación Gacheta, y la cual actualmente es una muy buena roca generadora en el sistema petrolífero de la cuenca.

Sedimentación del Cenozoico.

Formación Mirador (Eoceno Medio - Eoceno Tardío): Es una secuencia de cuarzo arenitas depositadas en un ambiente de fluvial a deltaico, con importante influencia marina y marino somero al tope. Su distribución es amplia en el Piedemonte Llanero y muestra una gran variación de su espesor por efectos estructurales y por acuífamiento hacia el oriente de la cuenca. El espesor en el área del Piedemonte varía entre 150 y 500 ft (50 -150 m). Dataciones palinológicas en la región le asignan un rango máximo de edad que va desde el Eoceno Medio al Oligoceno Temprano.

Formación Carbonera (Oligoceno – Mioceno): Está constituida por secuencias arenosas (C1, C3, C5, C7 y C9) depositadas en una llanura costera inferior con fuerte influencia marina (Bayona et al., 2007), separadas por unidades arcillosas-limosas (C2, C4, C6, C8 y C10) que aumentan hacia el occidente y podrían representar episodios de inundación; hacia el oriente se incrementan las facies arenosas debido a la proximidad al escudo de Guayana. La unidad contiene facies fluviales, estuarinos, llanuras de inundación, bahías y estuarios (Fajardo et al., 2000), Las facies arcillosas constituyen los sellos verticales y laterales para los yacimientos de la Formación Mirador localizados en el Piedemonte Llanero, y a su vez estas facies arcillosas constituyen sellos verticales y laterales a los niveles arenosos de la misma Formación Carbonera en la Cuenca Llanos. El espesor de esta unidad regionalmente varía de 1300 ft (400 m) en el norte de la cuenca a 8200 ft (2500 m) en el extremo sur. Dataciones palinológicas indican una edad Oligoceno -Mioceno.

Formación León (Oligoceno Tardío a Mioceno Temprano): Depositada durante una elevación global del nivel del mar que coincidió con los primeros eventos epirogénicos de levantamiento de la Cordillera Oriental. Se trata de una secuencia de lodolitas, areniscas y arcillolitas depositadas en un ambiente lagunar salobre a marino poco profundo; el contenido arenoso se incrementa hacia el occidente indicando que ya existía un piedemonte cordillerano. Su espesor oscila entre 1000 y 1700 ft (300 y 500 m), en esta parte se considera que tiene un espesor entre 400-600 ft de acuerdo con los espesores encontrados en los diferentes pozos. Regionalmente, la edad de esta unidad es incierta, ubicándose entre el Oligoceno Tardío y el Mioceno Temprano.

Formación Guayabo (Mioceno Medio a Tardío): Es una espesa secuencia siliciclástica con presencia de clastos gruesos, depositada en un ambiente continental como resultado del levantamiento y erosión de la Cordillera Oriental al occidente del sector del piedemonte. Se trata de conglomerados, areniscas y arcillolitas cuyo espesor oscila a nivel regional entre 1300 ft (400 m) en el sector nororiental de la cuenca, y 10000 ft (3000 m) en el extremo sur occidental en el Piedemonte Llanero. Ha sido datada como Mioceno Medio a Mioceno Tardío.

2.3 Estratigrafía local

En el área de estudio de este trabajo se tiene un registro tipo (figura 2-2), de un pozo perforado, al oeste del sub-volumen sísmico seleccionado en este trabajo, que se muestra en la Figura 1-1, donde se observan las unidades estratigráficas encontradas en la formación Carbonera.

El ambiente de depositación de la formación carbonera en el área de estudio está marcada por cambios entre ambientes fluviales, con algunos episodios de inundación en algunos de sus miembros informales, presencia de canales, zonas de desborde de canales algunas llanuras de inundación (Fajardo et al., 2000), que se reflejan en los registros de la zona estudio donde se evidencias pequeños cuellos lutíticos intercalados de arenas que pueden pertenecer a canales o a barras de meandro.

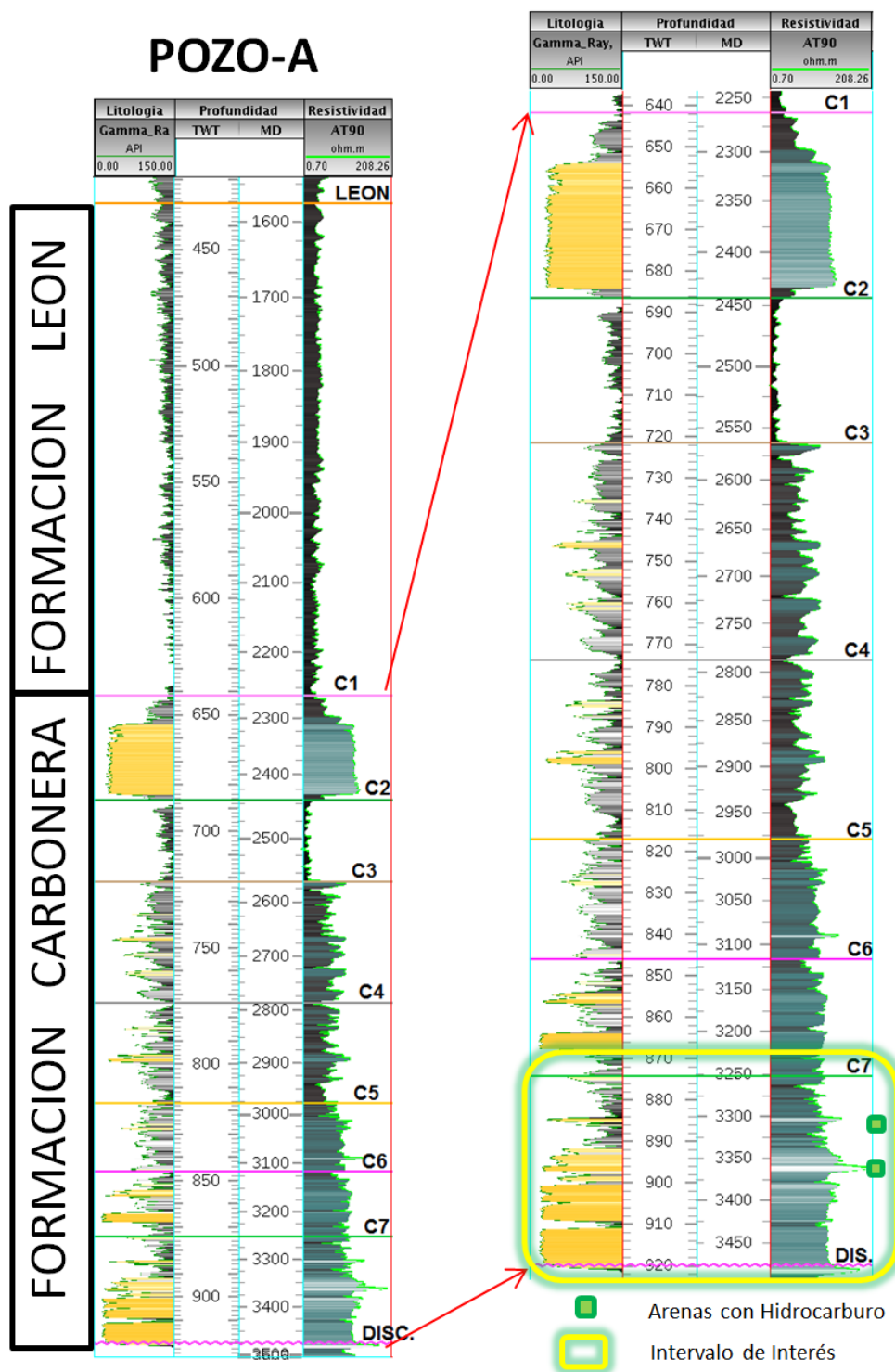
El aporte de sedimentos en la zona de estudio es principalmente del este de la cuenca desde el escudo de Guyana e influenciado por la presencia de canales de alta energía que se evidencian en la parte inferior de la discordancia Pre-Cretácica en los registros presentes en el área de estudio.

El intervalo de interés está definido por el miembro informal C7 donde se evidencia según el registro, una acumulación de hidrocarburos en la parte media y superior de C7, ambiente que muestra menor energía ya que en C6 hay un periodo de inundación evidenciado por la presencia de lutitas en el registro, muy cerca al tope de este mismo intervalo. La impregnación de hidrocarburos en C7 está caracterizada por unas arenas limpias con algunos periodos de inundación muy cortos los cuales constituyen un sello vertical importante en el sistema petrolífero del yacimiento.

En la parte derecha inferior de la figura 2-2 se observa la ventana de análisis para la presente investigación, donde se muestra que las arenas con acumulación de hidrocarburo son arenas muy delgadas inferiores a 30 pies lo cual hace difícil la caracterización de estas arenas a partir de los datos sísmicos.

También se observa en la parte derecha de la figura 2-2, como la litología de la formación Carbonera está caracterizada por intercalaciones de arenas y lutitas comúnmente identificados en ambientes fluviales.

Figura 2-2: Registro tipo (Pozo A) para el área de estudio.



3. Marco Teórico.

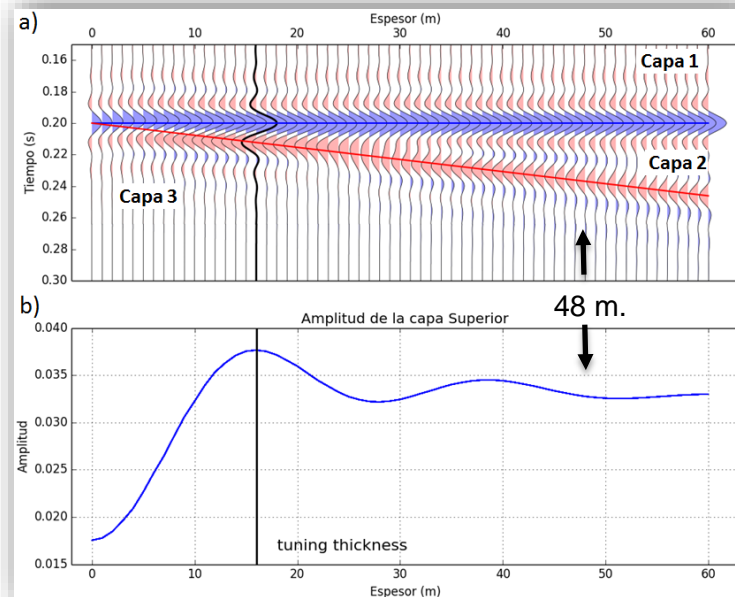
3.1 Definición de estratos finos

El análisis de un estrato fino o capa delgada, es difícil de interpretar en una traza sísmica, no es claro donde se encuentra el tope y la base del estrato fino a menos que exista un espesor considerable que permita marcar el tope y la base de este. Widess (1973), sugiere que la resolución sísmica vertical para un estrato fino está definido por $\lambda/8$ (Donde λ , longitud de onda está dada por la relación entre la velocidad y la frecuencia dominante). La definición más utilizada actualmente para explicar el límite de resolución sísmica para un capa delgada "thin bed", es el criterio de Rayleigh, el cual es de $\lambda/4$ (Zeng H. et al. 2015), y se conoce como el punto de entonamiento "*tuning thickness*".

En la figura 3-1a se presenta un modelo de cuña sintético de tres capas utilizando una ondícula Ricker de 30 Hz, en el cual se puede observar que las amplitudes de las trazas en las cuales el modelo tiene un espesor mayor a 48 m es constante, lo cual indica que la amplitud para espesores mayores a 48 m. no tiene interferencia constructiva ni destructiva.

Figura 3-1: Modelo de cuña para tres capas. Modificado de Hamlyn 2014.

a) Modelo sintético para tres capas. b) Comportamiento de la amplitud para el tope de la capa 2.



Para espesores menores a 48 m la interferencia comienza a ser constructiva hasta espesores menores a 17 m (punto de entonamiento del modelo), punto en el cual la interferencia se vuelve destructiva y la amplitud comienza a decaer.

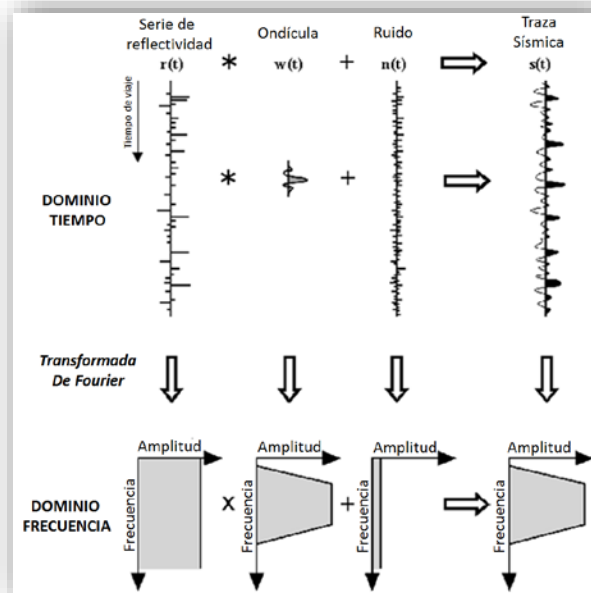
En la figura 3-1b se muestra el comportamiento de la amplitud para el tope de la capa 2 con respecto al espesor, se observa claramente como hay un incremento de amplitud desde la traza en la cual el modelo tiene un espesor de 38 m y como esta amplitud comienza a decaer cuando el modelo tiene un espesor de 16 m el cual se define como el punto de entonamiento o “*Tunning*”, el cual hace referencia a la modulación de las amplitudes sísmicas por causa de la interferencia constructiva y destructiva del solapamiento de las reflexiones sísmicas (Hamlyn, Wes 2014), este fenómeno ocurre cuando las capas están muy cerca, lo cual altera la respuesta sísmica del verdadero comportamiento geológico del subsuelo.

3.2 Descomposición espectral

La descomposición espectral es una técnica que consiste en transformar los datos sísmicos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia por medio de un operador matemático como la transformada discreta de Fourier, esta técnica no es única y depende del método que se utilice (Zeng H. et al., 2015).

Figura 3-2: Transformada de Fourier en una ventana larga.

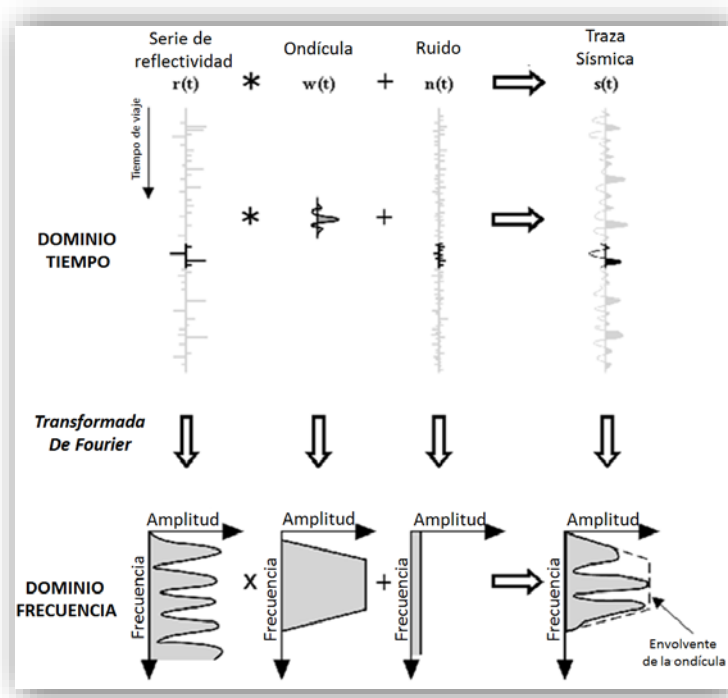
Modificado de Partyka, et al., 1999.



En la parte superior derecha de la figura 3-2 se muestra una traza sísmica en una ventana de tiempo larga, producto de la convolución de una serie de reflectividad con una ondícula, más una serie aleatoria que representa la presencia de ruido en la traza sísmica, por otro lado, en la parte inferior de la figura 3-2 se muestran los espectros de amplitudes para las series que intervienen en la generación de la traza sísmica, los cuales se obtienen al aplicar la transformada de Fourier en una ventana de tiempo larga, obsérvese que estos espectros no permiten obtener diferencias de amplitud con respecto a la frecuencia por este motivo Partyka, et al., 1999 utilizan la Transformada Discreta de Fourier en ventanas cortas (DFT), debido a que el espectro de amplitudes en ventanas cortas permite delimitar la variabilidad de los espesores de las capas.

Figura 3-3: Transformada de Fourier para una ventana corta.

Tomado y modificado de Partyka, et al., 1999.



La figura 3-3 muestra en la parte inferior la respuesta del espectro de amplitudes de una ventana de tiempo corta, la respuesta espectral de la traza sísmica está dada por la suma de la correlación cruzada de una serie de datos discreta con senos y cosenos, y una adición de ruido. De acuerdo a Partyka, et al., (1999) la respuesta del espectro de frecuencia aplicando la DFT depende de las propiedades acústicas y espesor de las capas presentes en la ventana de análisis, de este modo la geología actúa como un filtro local atenuando el espectro de la traza sísmica resultante, representando este un patrón de interferencia dentro de la ventana de análisis.

3.3 Inversión espectral

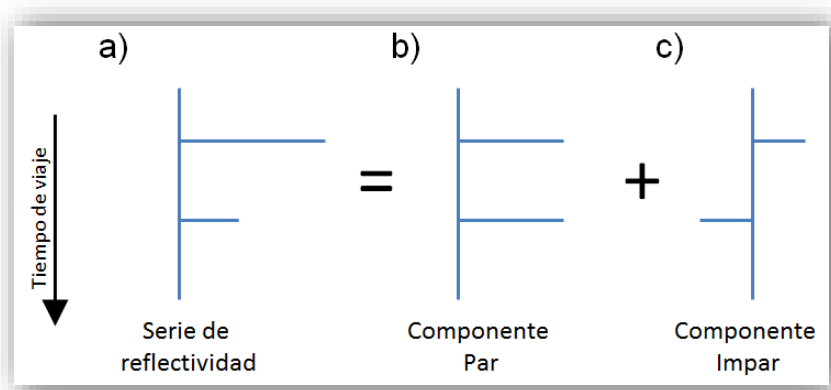
Las capas estratificadas se pueden representar por medio de una serie de reflectividades, con base en esto, la inversión espectral se puede definir como una técnica que utiliza la información de los cambios de pendiente obtenidos de la descomposición espectral de la traza para mejorar las imágenes sísmicas por debajo del punto de entonamiento o “*Tunning*” (Zeng H. et al., 2015). El resultado obtenido de la inversión espectral es una serie de reflectividades que mejora el cálculo del espesor de las capas.

El método formulado por Puryear C. et al., (2008) propone invertir el espectro de frecuencia de una traza sísmica en una serie de reflectividad que represente los espesores de las capas en la ventana de análisis, teniendo en cuenta que la respuesta del espectro de frecuencia en una ventana de tiempo corta refleja caídas de amplitud que se relacionan con el espesor de las capas que se encuentran en la ventana de análisis Partyka et al., (1999). Este método puede reducir significativamente la estimación del espesor de las capas si existe un contraste de impedancia entre ellas, y puede ser utilizado sin la calibración de amplitud de los espesores medidos en los pozos que se encuentren en el área donde se adquirió la sísmica (Zeng H. et al., 2015).

Un coeficiente de reflexión es la relación existente entre la amplitud de la onda reflejada y la amplitud de la onda incidente, en otras palabras, es la medida de la energía que se refleja. De acuerdo con Castagna (2004) y Chopra et al., (2006) cualquier pareja de coeficientes de reflexión r_1 y r_2 puede descomponerse en su parte par e impar, en donde la componente par tiene igual magnitud y signo, y la componente impar tiene igual magnitud y signo opuesto como se muestra en la figura 3-4.

Figura 3-4: Descomposición de una serie de reflectividad en su parte par e impar.

a) Serie de reflectividad. b) Componente par. c) Componente impar.



Entonces, una traza sísmica se puede explicar mediante un sismograma sintético, el cual es una forma de modelar la respuesta sísmica de la tierra, en otras palabras, una traza sísmica $x(t)$ o un sismograma sintético se puede definir como la convolución (*) de una serie de reflectividades $r(t)$, que se asemeja a la respuesta de las capas del subsuelo, con una ondícula sísmica $w(t)$, más una serie aleatoria $n(t)$ que representa la presencia de ruido ambiental.

$$x(t) = w(t) * r(t) + n(t) \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Asumiendo una ondícula $w(f)$, entonces la descomposición espectral de una traza sísmica $s(f)$ dentro de una ventana de análisis $[-tw \ tw]$ se puede expresar con (Puryear and Castagna, 2008):

$$s(f) = w(f) \cdot \int_{-tw}^{tw} \{r_e(t) \cos[\pi f T(t)] + i r_o(t) \sin[\pi f T(t)]\} dt \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Donde, se muestra que cada coeficiente de reflexión par $r_e(t)$ e impar $r_o(t)$, se relaciona directamente con el espesor de la capa $T(t)$ en una frecuencia determinada f .

El algoritmo comienza aplicando la Transformada rápida de Fourier (FFT) en la ventana de análisis $[-tw \ tw]$ de la traza sísmica $x(t)$ y la ondícula $w(t)$, luego se divide toda la ecuación en la ondícula $w(f)$, posteriormente se emplean dos funciones (α_e y α_o), para asignar pesos a la componente par y la componente impar respectivamente, estas funciones definen el aporte de cada una de las componentes a la traza sísmica en la ventana de análisis.

La solución de la ecuación 3.2 ocurre cuando la Función Objetivo $O(t, r_e, r_o, T)$ se minimiza mediante la búsqueda de parámetros geológicamente razonables (r_e, r_o, T) entre el límite de frecuencia mínima (fL) y el límite de frecuencia máxima (fH).

$$O(t, r_e, r_o, T) = \int_{fL}^{fH} \left[\alpha_e \left\{ \operatorname{Re} \left[\frac{s(f)}{w(f)} \right] - \int_{-tw}^{tw} r_e(t) \cos[\pi f T(t)] dt \right\} + \alpha_o \left\{ \operatorname{Im} \left[\frac{s(f)}{w(f)} \right] - \int_{-tw}^{tw} r_o(t) \sin[\pi f T(t)] dt \right\} \right] df \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

3.4 Algoritmo Genético

Un algoritmo genético (AG) es un método de optimización desarrollado por Goldberg (1989) basado en la teoría de evolución de Darwin que afirma que la supervivencia de un organismo es afectada por una regla "La especie más fuerte sobrevive".

Para este trabajo el AG utiliza una población inicial de individuos los cuales se denominan cromosomas y están definidos por una serie de reflectividades $r_e(t)$, y una serie de espesores en tiempo $T(t)$, cada elemento de estas series es llamado gen, estos individuos se reproducen con otros individuos de la población, formando nuevos individuos los cuales se adaptan mejor a la función objetivo (ecuación 3.3), este proceso se repite varias veces hasta que llega a un mínimo global de la función objetivo, cada repetición de este proceso es una generación.

De acuerdo a Marek, O. (1998), existen muchos métodos para seleccionar los mejores individuos en una población, por ejemplo los mecanismos de Ruleta, Boltzaman, Torneo, Clasificada, etc., siendo el método de selección Clasificada uno de los más sencillos y utilizados en la implementación de los algoritmos genéticos.

En este trabajo se utilizó el mecanismo de selección Clasificada, el cual se caracteriza por dar una posición o calificación a cada individuo de acuerdo al valor que se obtenga cuando estos individuos se reemplacen en la ecuación 3.3.

En la etapa de reproducción en el AG de este trabajo se hizo con base en un punto de cruce simple, primero se generan las parejas de reproducción al azar y luego estas se cruzan en un solo punto, este punto de cruce también es aleatorio y a partir de este punto se define la cantidad de genes que aportará la madre y la cantidad de genes que aportará el padre.

La mutación es un proceso estocástico que depende principalmente de la probabilidad de ocurrencia del mismo, en otras palabras, depende del porcentaje de mutación con el cual el algoritmo genético trabaje, en el AG aplicado en este trabajo, el porcentaje de mutación no supera el 0.001, quiere decir que para la población, la probabilidad de que un individuo tenga una mutación, ósea que uno de sus genes se cambie aleatoriamente es de 0.001, el cual se realiza también aleatoriamente en uno de los genes del individuo.

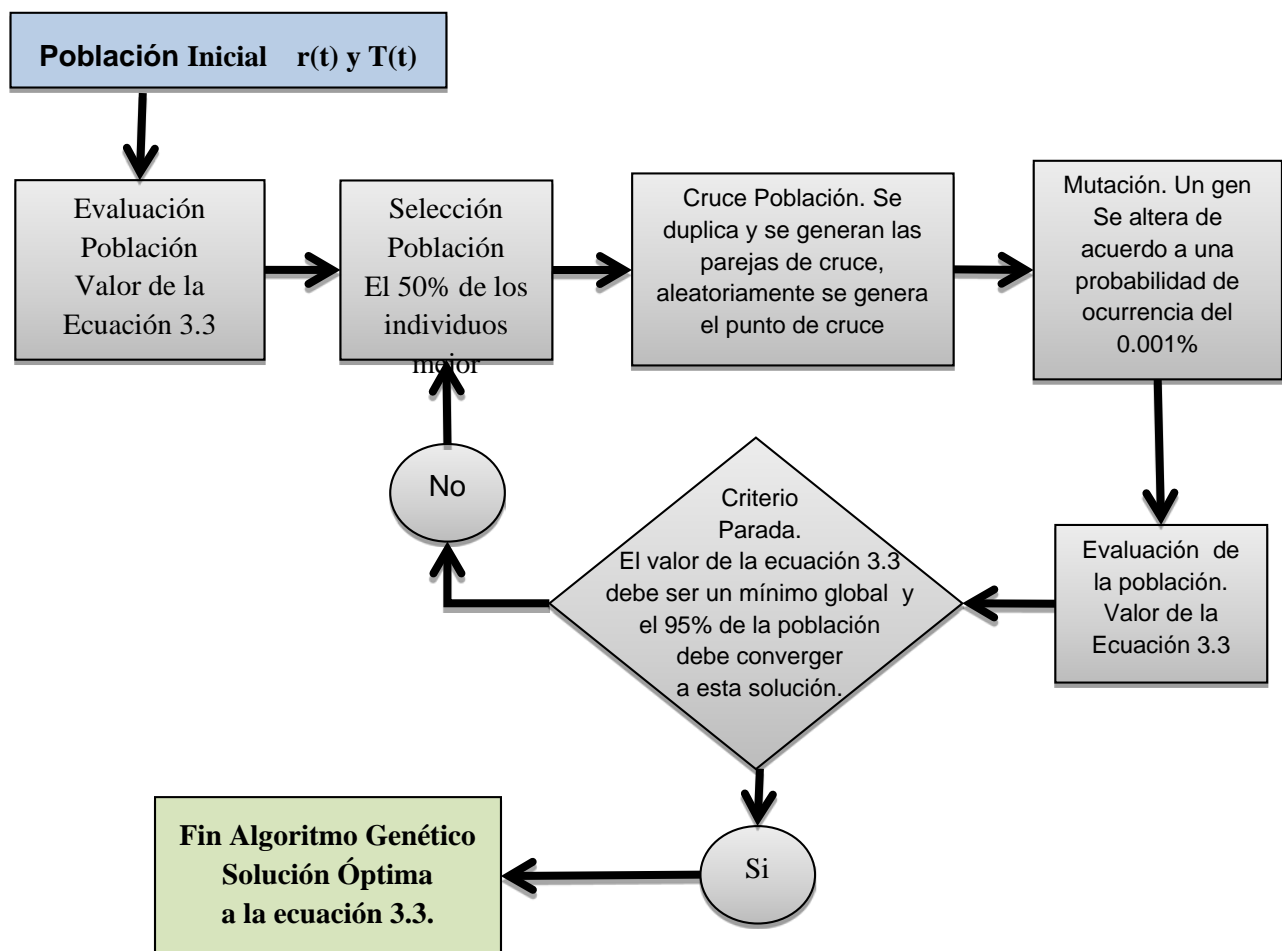
El objetivo de la mutación es evitar que la función objetivo caiga en un mínimo local, pero su probabilidad de ocurrencia debe ser baja para evitar que la búsqueda del mejor individuo se convierta en una búsqueda aleatoria (Marek, O. 1998.)

De acuerdo a Goldberg (1989) el criterio de convergencia ideal para un algoritmo genético es aquel que garantice que todos y cada uno de los parámetros convergen

de forma independiente, pero esto puede demandar demasiado tiempo computacional representado en muchas iteraciones, por lo tanto es mejor definir criterios establecidos de acuerdo a la evaluación de la población.

En el AG aplicado en este trabajo que se muestra en la figura 3-5, la evaluación de la población se hizo con base en el valor función objetivo del algoritmo (ecuación 3.3), y el criterio de parada para la inversión espectral se definió en el valor de la evaluación y la convergencia de toda la población hacia ese valor, lo cual infiere a que todos los individuos o por lo menos el 95 % de ellos tienen los mismos genes y el mismo valor de evaluación que debe ser el mínimo global de la función objetivo.

Figura 3-5: Algoritmo Genético utilizado en la inversión espectral.



3.5 Lógica Difusa

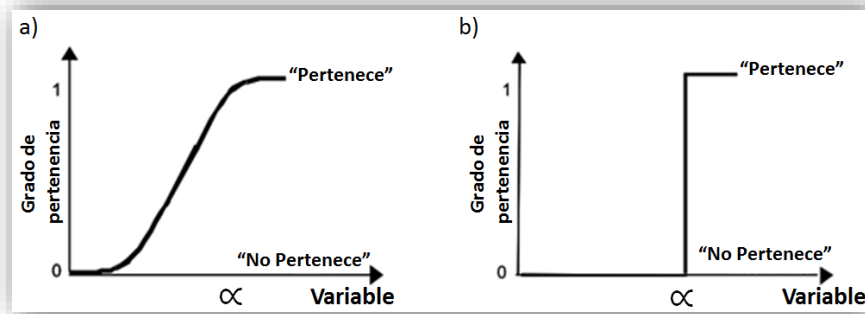
La Lógica difusa generaliza la lógica clásica y es una rama de la inteligencia artificial, permite manejar la complejidad de la información (Souverville, et al., 2015). Los elementos sobre los que se construye el pensamiento humano son etiquetas lingüísticas (Zadeh, L. 1965.), por lo tanto la lógica difusa permite representar en un lenguaje matemático, a través de la teoría de conjuntos difusos y funciones asociadas a ellos, el comportamiento de un fenómeno descrito por medio de datos o medidas (Ramirez, A. et al., 2005).

El algoritmo de interpolación basado en lógica difusa propuesto, se basa en las amplitudes de las trazas sísmicas de cada uno de los mapas en tiempo (*timeSlice*). La lógica clásica sugiere calcular el valor de amplitud sobre un BIN (área sobre la cual las trazas son apiladas) interpolado de acuerdo al promedio de los valores que se encuentren a su alrededor, mientras que la lógica difusa estima el valor de amplitud del BIN interpolado con reglas difusas que se declaran de acuerdo al comportamiento de los datos.

Los conjuntos difusos son una generalización de los conjuntos clásicos (Ramirez, A. et al., 2005), La figura 3-6b muestra como la lógica clásica estima valores de pertenencia de 0 o 1, en contraste, en la figura 3-6a muestra como la lógica difusa, estima valores de pertenencia entre 0 y 1, en otras palabras, el grado de pertenencia puede tener valores entre cero y uno de una manera continua y no de una manera discreta como en los conjuntos clásicos.

Figura 3-6: Lógica clásica versus lógica difusa.

a) Visión de la lógica difusa. b) Visión de la lógica clásica.



Para ilustrar el concepto de conjuntos difusos, se puede definir el conjunto "rocas arcillosas". Según la teoría de la lógica clásica el conjunto "rocas arcillosas" es un conjunto al que pertenecerían las rocas con un porcentaje de arcilla mayor a un cierto

valor, por ejemplo 70% de su volumen total, todas las rocas con un porcentaje inferior a este valor quedarían fuera del conjunto. Entonces, una roca que tiene el 71% de arcilla de su volumen total pertenecería al conjunto rocas arcillosas, y en cambio una roca que tenga el 69% de arcilla en su volumen total ya no pertenecería a ese conjunto. Sin embargo, no parece muy lógico decir que una roca no es arcillosa y otra si lo es cuando el porcentaje difiere por solo el 2%.

El enfoque de la lógica difusa considera que el conjunto “rocas arcillosas” es un conjunto que no tiene una frontera clara para pertenecer o no pertenecer a él: mediante una función que define la transición de “roca arcillosa” a “roca no arcillosa” se asigna a cada valor de porcentaje de arcilla un grado de pertenencia al conjunto, entre 0 y 1. Así por ejemplo, una roca que tenga el 69% de arcilla en su volumen total podría pertenecer al conjunto difuso “rocas arcillosas” con un grado 0.8 de pertenencia, una roca que tenga el 71% de arcilla de su volumen total pertenecería al conjunto con un grado 0.85, y una roca que tenga apenas el 20% de arcilla pertenecería al conjunto con un grado 0.1. Visto desde esta perspectiva, la lógica clásica es un caso límite de la lógica difusa en el que se asigna un grado de pertenencia 1 a las rocas con valor mayor o igual a 70% de arcilla de su volumen total y un grado de pertenencia 0 a los demás.

La forma de la función característica depende del criterio aplicado en la resolución de cada problema (Ramirez, A. et al., 2005), es decir, variará en función del fenómeno que se estudie. Esta función característica se puede determinar con base en la experiencia del investigador que estudie el fenómeno o utilizando los datos para diseñar o modelar la función. Una variable puede tener varias funciones características asociadas a la vez, esto dependerá del experto que estudie el fenómeno y también del hecho que cuantas más funciones características se utilice se puede tener más resolución pero también mayor complejidad computacional.

En el algoritmo de interpolación propuesto en este trabajo, los conjuntos difusos hacen referencia a cada una de las direcciones de interpolación existentes y el grado de pertenencia se refiere a la correlación de los valores de amplitud de cada BIN dentro del mapa en tiempo, en cada dirección de interpolación.

Las reglas difusas se definen como el conjunto de proposiciones que permiten modelar el problema que se quiere resolver (Ramirez, A. et al., 2005), es decir, proposiciones de la forma Si (se cumple la proposición) - Entonces (implicación lógica), por ejemplo, si se tienen dos conjuntos difusos A y B definidos en los rangos " u " y " v " respectivamente la regla difusa estaría dada por "Si u es A Entonces v es B" (Ramirez, A. et al., 2005).

Las reglas difusas que se utilizaron en el algoritmo de interpolación propuesto en este trabajo, se construyeron con base en el análisis de correlación de los datos de las amplitudes, por lo tanto el valor interpolado siempre está en función del comportamiento de la amplitud de los BIN que se encuentren alrededor del BIN que se desea interpolar.

La capacidad de la lógica difusa para manejar ambigüedad e imprecisión en numerosos problemas ha motivado el incremento de dicha técnica en el procesamiento de imágenes digitales (Brox, P. et al., 2007), en especial en el incremento de resolución. El algoritmo de interpolación basado en lógica difusa es utilizado en imágenes digitales por medio de una correlación direccional entre píxeles en tres direcciones principales, una dirección vertical y dos diagonales (Sourville S. et al., 2015).

De acuerdo con el excelente desempeño que ha tenido la lógica difusa en la interpolación de imágenes digitales, en este trabajo se utilizó un algoritmo basado en esta lógica que permita mejorar la resolución lateral de los datos sísmicos.

3.6 Atributos Sísmicos

Los atributos sísmicos pueden definirse como medidas específicas de características geométricas, cinemáticas, dinámicas o estáticas provenientes de los datos sísmicos (Chen and Sydney, 1997). De acuerdo a Guerrero, J. 2001, uno de los atributos más simple y más frecuentemente utilizado, es la amplitud sísmica, usualmente haciendo referencia al máximo valor de amplitud ya sea positivo o negativo en cada punto común en profundidad (CMP), a lo largo de un horizonte interpretado en el cubo de datos 3D.

El valor de amplitud de una traza sísmica no es proporcional a una propiedad física cualquiera, y la suposición de que esta represente una propiedad física específica puede llevar a cometer errores de interpretación geológica del subsuelo, por lo tanto, un buen atributo sísmico es aquel que me represente mejor los rasgos geológicos o propiedades de un reservorio, en términos de ambiente de depositación y contexto estructural, y que además me permita inferir características y propiedades físicas en el intervalo de interés (Brown, A. 2001).

De acuerdo a Taner et al., (1994) los atributos Post-apilados pueden ser divididos en atributos de tipo instantáneo y atributos interválicos. Los primeros nos ayudan a identificar cambios estructurales y los segundos están muy relacionados con la litología de la roca. Para esta investigación se usaron los siguientes atributos:

1. El atributo "Root Mean Square" (RMS), es tal vez el más usado en la industria, debido a que es de gran utilidad porque puede ser usado para mapear la reflectividad asociada a los aspectos estratigráficos de la formación o ventana de interés y la asociada a anomalías de amplitud "puntos brillantes" (Castaño, 2010). Se define como la raíz cuadrada de la suma de las amplitudes al cuadrado, divididas por el número de trazas dentro de una ventana de análisis específica.

$$A_{RMS}(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{K=-N/2}^{N/2} (f(t+k))^2}$$

(Ecuación 3.4)

En general, este atributo realza el contenido de energía en una traza sísmica, es utilizado para distinguir tipos de litología, por ejemplo, altos valores de amplitud RMS son comúnmente relacionadas a litologías de arenas con altas porosidades. (Pereira, et al., 2009).

2. El atributo de varianza está definido como una medida de dispersión que me indica que tan alejado se encuentra un dato de su valor medio (ecuación 3.5).

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^l (x_i - \bar{x})^2$$

(Ecuación 3.5)

De acuerdo a Van Bemmél, P. et al., (2000), el cálculo de este atributo para cada una de las trazas en una ventana corta de tiempo y en un número de trazas definidas por el usuario, se realiza por la siguiente ecuación:

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum_{j=t-\frac{L}{2}}^{j=t+\frac{L}{2}} w_{j-t} \sum_{i=1}^l (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{\sum_{j=t-\frac{L}{2}}^{j=t+\frac{L}{2}} w_{j-t} \sum_{i=1}^l (x_{ij})^2}$$

(Ecuación 3.6)

Donde x_{ij} es el valor de la muestra en la posición horizontal i , j es la posición vertical de la muestra en el dominio del tiempo. w_{j-t} Es un término de suavizado vertical sobre la ventana de longitud L .

El atributo de varianza difiere de atributos como semblanza y coherencia, los cuales son muy utilizados para identificar discontinuidades, porque el atributo de varianza calcula directamente la diferencia del valor de la traza con el valor medio dentro de la ventana definida por el usuario.

Este atributo es muy útil para la identificación de bordes o discontinuidades, en términos generales, una ventana larga en tiempo muestra mejor discontinuidades

laterales, y una ventana corta muestra discontinuidades horizontales (Pereira, L. et al., 2009).

3. El atributo Sweetness fue desarrollado en los años 90's, el cual fue probado con datos adquiridos en el golfo de México, con el fin de delimitar zonas con litologías de baja densidad y alta porosidad. Este atributo es derivado de la combinación entre frecuencia instantánea y amplitud instantánea matemáticamente está definido en la ecuación 3.7. (Hart, B. 2008).

$$Sweetness = \frac{Amplitud_{Instantánea}}{\sqrt{Frecuencia_{instantánea}}}$$

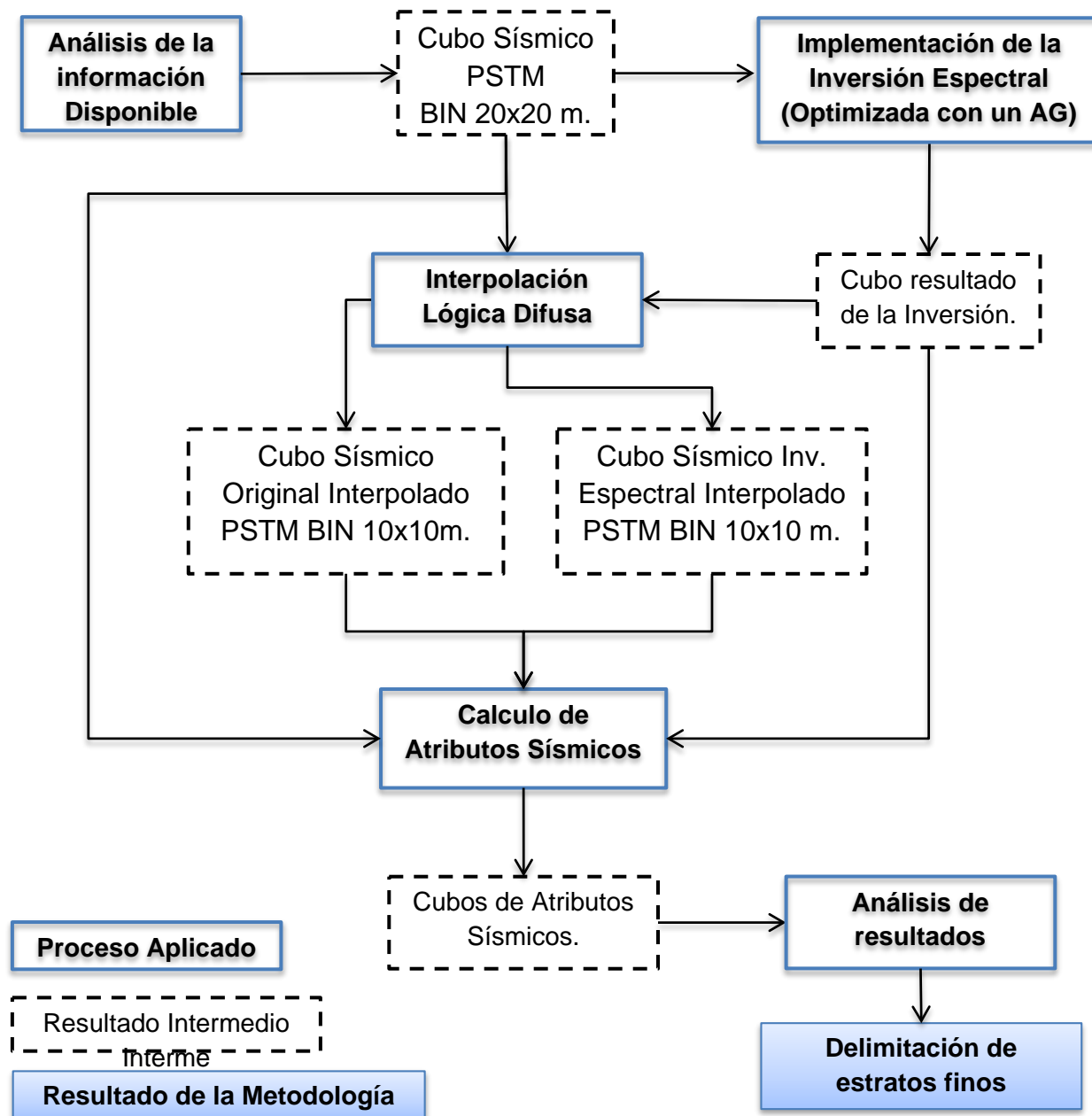
(Ecuación 3.7)

Aunque físicamente es difícil de explicar, este atributo trabaja bastante bien en áreas donde hay contrastes de impedancia entre paquetes de arena y lutitas. Es muy útil para caracterizar canales con litologías distintas lo cual lo hace una excelente herramienta estratigráfica, debido a que este atributo representa cambios en la forma de la traza sísmica causados por cambios estratigráficos (Hart, B. 2008).

4. Metodología.

La metodología utilizada en este trabajo corresponde al diagrama de flujo mostrado en la figura 4-1.

Figura 4-1: Metodología Utilizada.



En la figura 4-1, se muestra un diagrama de flujo, en el cual, se realiza un análisis de la información sísmica donde se calcula la resolución de los datos sísmicos, teniendo en cuenta los datos de los pozos A y B dentro del área de estudio, también se selecciona la ventana de interés de acuerdo a la información petrofísica de los pozos para realizar la selección de la ventana en tiempo en la cual se ejecuta la inversión espectral.

Paralela a esta actividad se probó el AG que implementa la inversión espectral, en dos modelos sintéticos los cuales validaron la capacidad de resolver la posición de los topes de los estratos finos en cada uno de los modelos propuestos, adicionalmente se evaluó el uso de varias ondículas en el AG para una traza sísmica real, con el fin de evaluar el desempeño de la ondícula y la capacidad del AG para resolver los principales topes en la ventana de análisis.

Una vez obtenido el cubo resultado de la inversión espectral optimizada con el AG, se ejecutó el algoritmo de interpolación basada en lógica difusa en el cubo obtenido de la inversión y el cubo original de datos sísmicos.

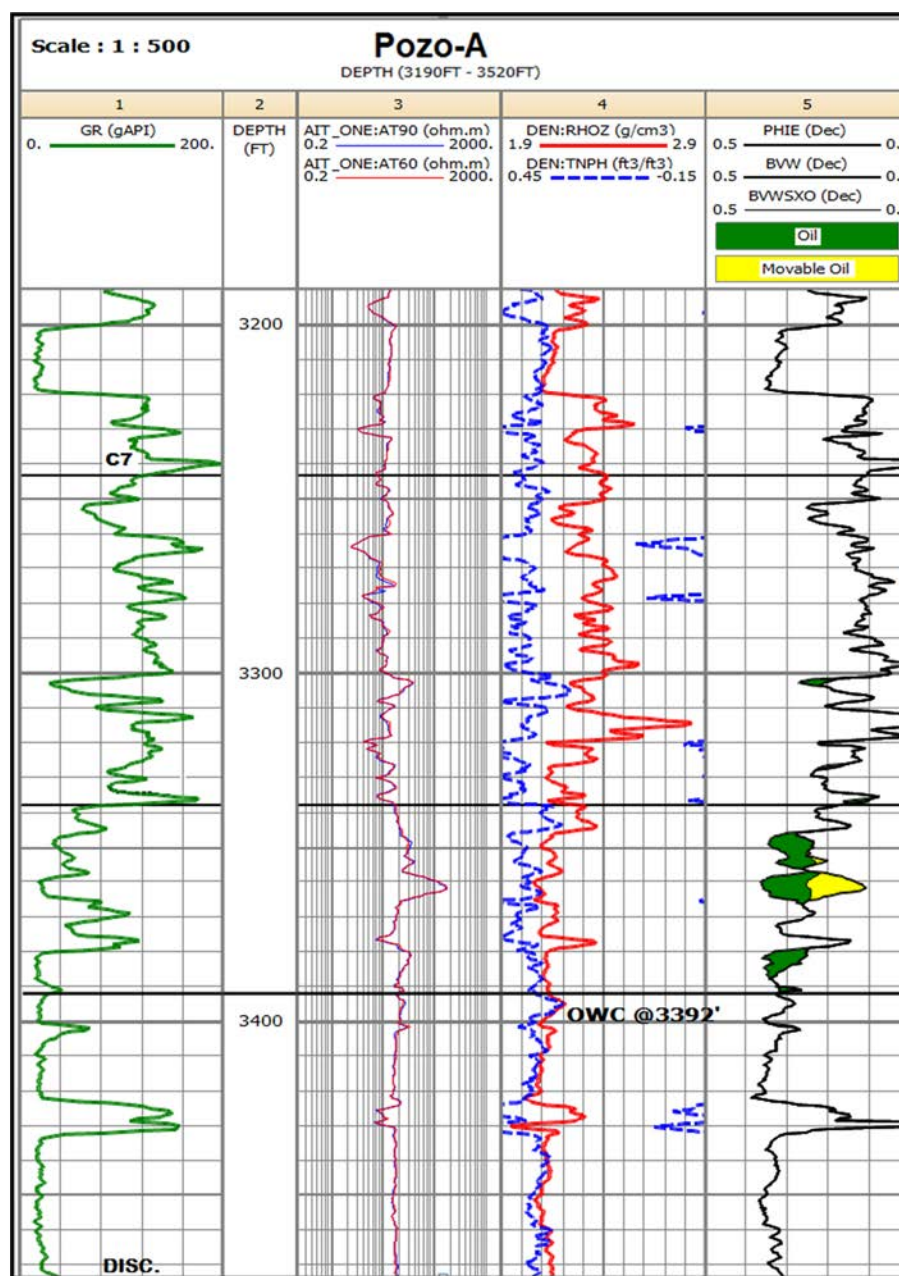
Al aplicar el algoritmo de interpolación al cubo original y al cubo invertido, obtenemos dos cubos los cuales tienen un BIN de 10 x 10 m. los cuales tienen mejor resolución horizontal que los cubos iniciales de BIN de 20 x 20m., posteriormente se calcula el atributo de amplitud RMS, Sweetness y varianza para cada uno de los cuatro cubos sísmicos, finalmente se analizaron los resultados los cuales se muestran en el capítulo 5.

4.1 Análisis de la información

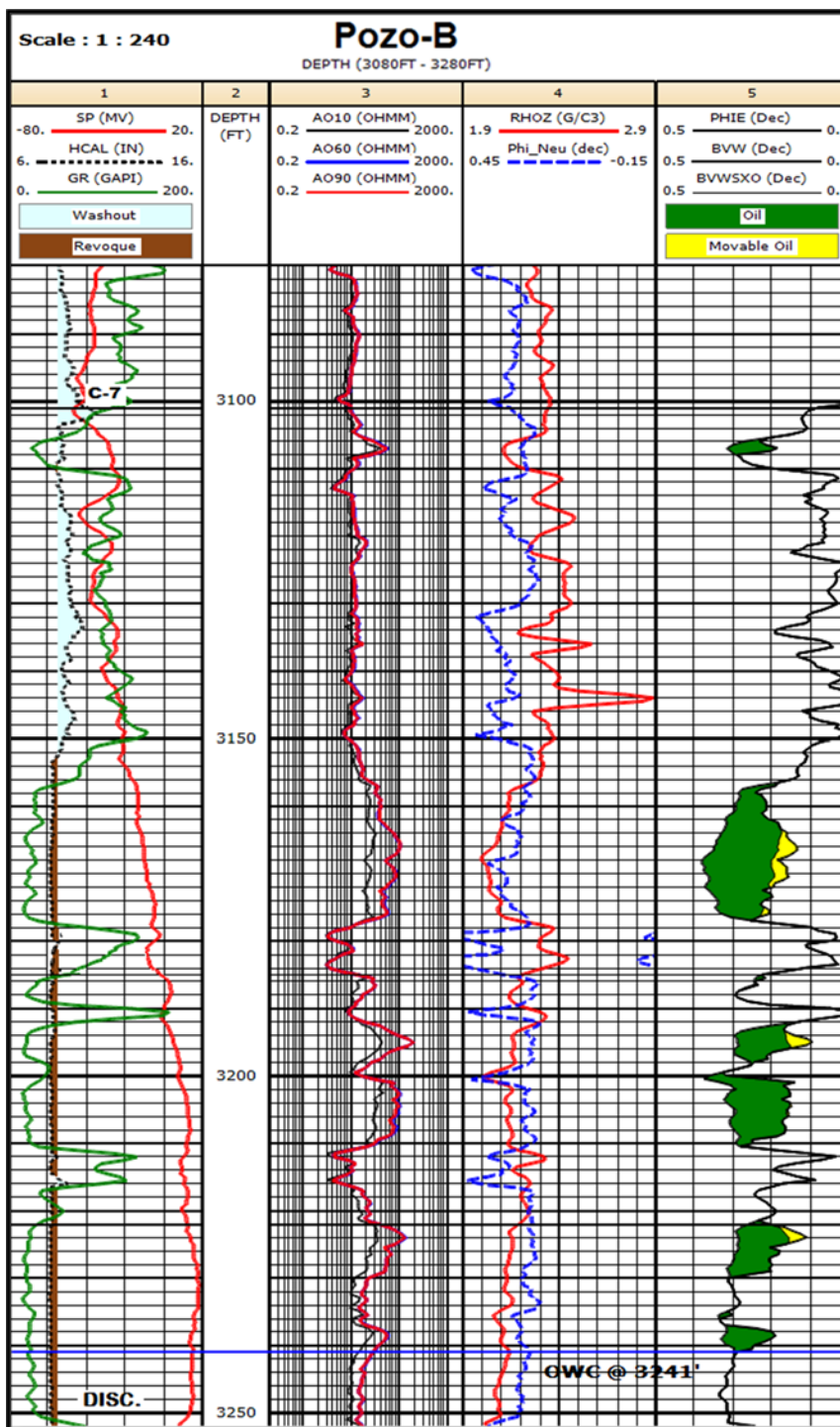
La información de los pozos disponibles en el área de estudio, está conformada por el Pozo A con una profundidad 3520 ft, ubicado al oeste del área de estudio y el pozo B con una profundidad de 3335 ft, ubicado en el costado oriental del cubo sísmico, los cuales llegan a la discordancia Pre-Cretácica.

La evaluación petrofísica para el pozo A (figura 4-2), muestra que la zona delimitada entre 3330 ft y 3390 ft, la cual tiene una porosidad efectiva en promedio de 25%, de acuerdo a la columna 5 de la figura 4-2, hay presencia de arenas con hidrocarburo con espesores entre 10 y 15 ft, marcando un contacto agua aceite a una profundidad de 3392 ft. Por este motivo y con el fin de delimitar estos estratos, la ventana de interés en la que se centra este trabajo para datos reales, está comprendida entre el tope de C7, el cual está a 3243 ft de profundidad, y el tope de la discordancia Pre-Cretácica, el cual se encuentra a 3485 ft de profundidad para el pozo A, para un total de 242 ft de espesor. El registro sísmico para la ventana de interés se muestra en la figura 4-5.

Figura 4-2: Evaluación petrofísica pozo A. (Pacific E&P 2012)



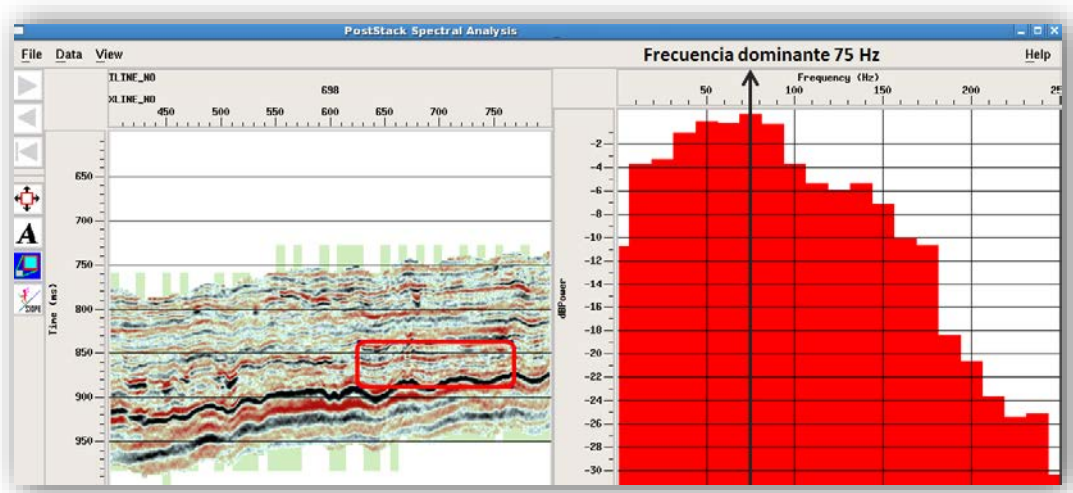
En la figura 4-3 se muestra la evaluación petrofísica del pozo B, en la cual el tope de C7 se encuentra en 3100 ft y el tope de la discordancia Pre-Cretácica a 3250 ft, para un espesor de 150 ft en la parte este del área de estudio, en contraste, con los 242 ft de espesor de la parte oeste que muestra el pozo A, por lo tanto el área de estudio tiene mayores espesores en la parte oeste, hacia la ubicación del pozo A que en la parte este de la cuenca donde se encuentra el pozo B .

Figura 4-3: Evaluación petrofísica pozo B. (Pacific E&P 2012)

En la columna 5 de la figura 4-3, se observan arenas con hidrocarburo desde 3160 ft hasta 3240 pies, en los cuales hay arenas con espesores de aproximadamente 30 ft y arenas menores a 15 ft. Por otra parte, se observa que la porosidad efectiva en estas arenas con hidrocarburo, está aproximadamente entre el 30% y 35%, lo cual es importante en la explotación de arenas con crudo pesado, como lo es el caso de estudio en este trabajo de tesis.

Para establecer el alcance de la interpretación geológica que se puede tener con los datos sísmicos, se realizó un análisis de la resolución vertical. En la parte derecha de la figura 4-4, se puede observar el espectro de amplitudes para la ventana delimitada por el cuadro rojo en la parte izquierda de la misma figura y en la cual se muestra la sección sísmica de la Inline 698. Entre 840 y 870 ms la frecuencia dominante es de 75 Hz, utilizando una velocidad promedio de 2190 m/s (7184.95 ft/s), la cual se obtuvo del promedio de la curva de velocidades del Pozo A y el Pozo B (figura 4-5). Con estos valores se calculó la longitud de onda en 29.2 m. (95.8 ft. Aprox.), lo que implica que el punto de entonamiento o "*Tunning*" (ver capítulo 3), que representa el espesor mínimo que los datos sísmicos pueden resolver en la ventana de análisis es de 7.82 m (24 ft. Aprox.).

Figura 4-4: Espectro de amplitudes del sub-volumen extraído.

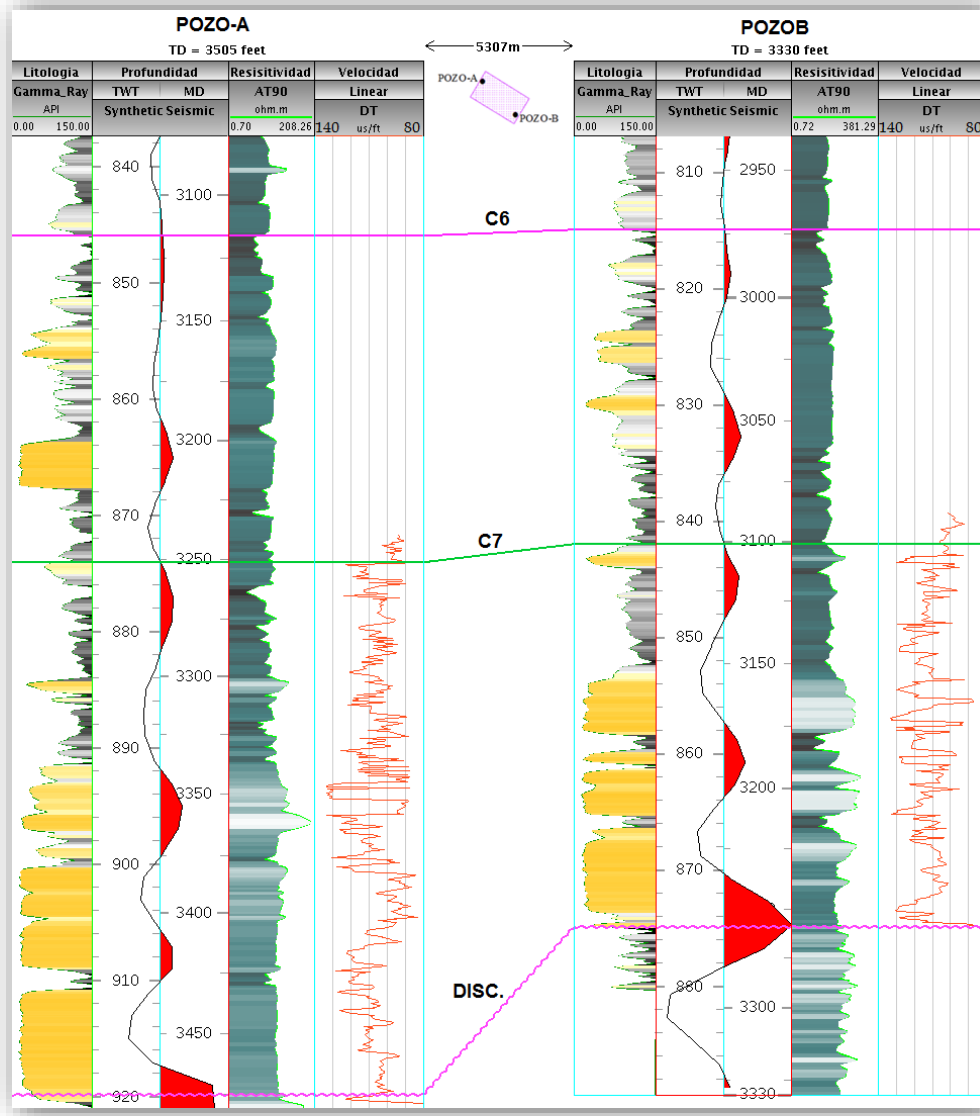


Para completar el análisis de la información se realizó una amarre sísmica – pozo, por medio de las tablas tiempo profundidad para los pozos A y B. Además se generó una correlación litoestratigráfica (figura 4-5), en la cual se observa que existen espesores mayores de arenas en la zona donde está ubicado el pozo A, entre el tope de C7 y la discordancia Pre-Cretácica. También se puede observar la diferencia entre la resolución vertical de los datos sísmicos (segunda columna en cada pozo) y la resolución vertical de los registros de los pozos (columnas laterales en cada pozo).

La traza sintética para los pozos A y B se generaron con una ondícula Ricker de 85 Hz, luego de probar con ondículas extraídas de la sísmica y ondículas con frecuencia dominante entre 70 y 90 Hz, el mejor resultado del amarre se obtuvo con la ondícula de 85 Hz. Por ejemplo para el pozo A entre 895 y 900 ms, se aprecia que la traza sintética del pozo responde al contraste de impedancia existente entre las arenas y las lutitas que se muestran en la columna de litología donde los colores amarillos indican arenas y colores oscuros presencia de lutitas.

Figura 4-5: Correlación litoestratigráfica de Pozos A y B.

Aplanada al tope del miembro informal C3.



4.2 Implementación de la inversión espectral.

Para el cálculo de la función objetivo (ecuación 3.3) se implementó un código desarrollado en el software Matlab R2014a (Anexo A), este código recibe dos variables de entrada, el primero, un arreglo $T(t)$ que expresa las posiciones de los coeficientes de reflexión en la ventana de análisis $w(t)$, y el segundo que también es un arreglo, contiene los valores de los coeficientes de reflexión $r(t)$. La traza $S(f)$ y la ondícula $w(f)$, son constantes para el algoritmo y como tal se declaran cuando inicia el algoritmo, estos valores se guardan en una variable global que es llamada por el código que calcula la función objetivo.

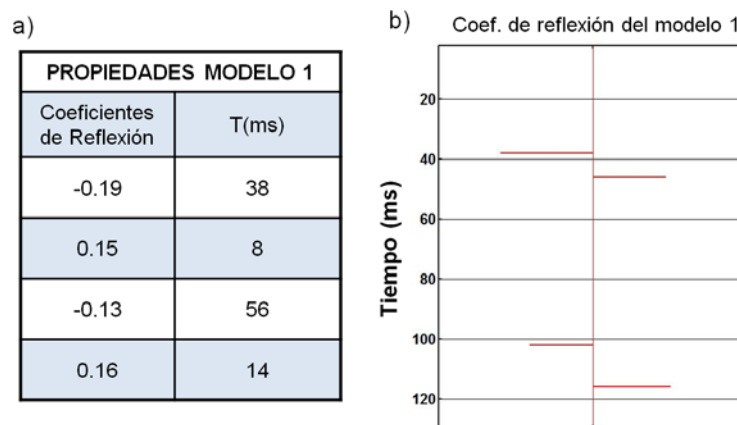
Para generar los sismogramas sintéticos se utilizó la librería de uso público SeisLab 3.02 (Rietsch, E. 2015), mediante la convolución de un arreglo de coeficientes de reflexión en función del tiempo y una ondícula de tipo Ricker a distintas frecuencias para modelos sintéticos y datos reales.

4.2.1 Modelos sintéticos.

Para evaluar la inversión espectral bajo condiciones controladas, se generaron dos modelos sintéticos con distinto número de capas y espesores, con el fin de determinar el rendimiento del algoritmo en un escenario simple de tres capas y en un escenario más complejo de 8 capas, utilizando la misma ventana de tiempo de análisis de 128 ms y una rata de muestreo de 2 ms para los dos modelos.

Figura 4-6: Propiedades del modelo sintético 1.

a) Propiedades para el Modelo 1. b) Serie de reflectividad para el Modelo 1.

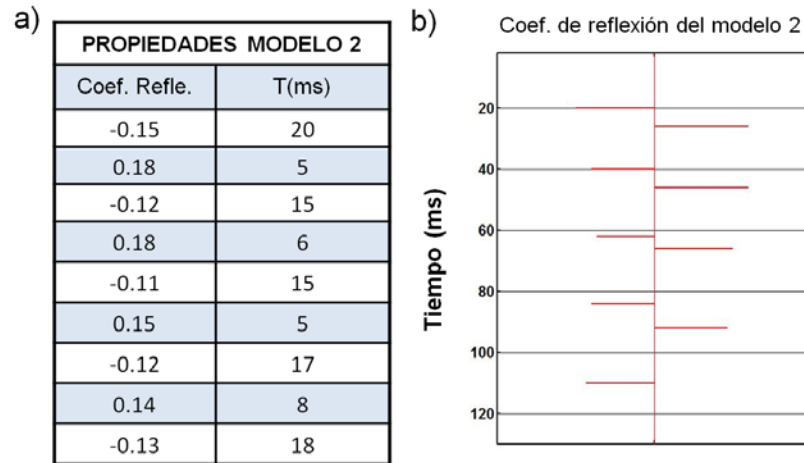


En la figura 4-6a se muestran las propiedades del Modelo 1, donde se observa que el tope de la primera capa está a 38 ms del inicio de la ventana de tiempo, 8 ms después se encuentra el tope de la segunda capa (en la figura 4-5 8 ms equivalen a

un espesor de aproximadamente 32 ft), y finalmente continua una capa mucho más gruesa, cuya base se encuentra a 56 ms del tope de esta capa, esta combinación de capas gruesas y capas delgadas se realizó con el fin de evaluar la capacidad del algoritmo en resolver las posiciones de los coeficientes de reflexión.

Figura 4-7: Propiedades del modelo sintético 2.

a) Propiedades para el Modelo 2. b) Serie de reflectividad para el Modelo 2.



En la figura 4-7a se muestran las propiedades del modelo sintético 2, este modelo a diferencia del modelo 1, tiene menor variabilidad en el espesor de sus capas, el tope de la primera capa se encuentra a 20 ms y su base a 5 ms del tope, esta capa es la capa más delgada del modelo, con el fin de simular capas con un espesor de aproximadamente 20 ft, también se encuentra una capa con un espesor mayor en la base del modelo, cuyo tiempo entre el tope y la base es de 18 ms, la diferencia de espesores en este modelo se realizó con el fin de simular las arenas con hidrocarburo que se observan en la figura 4-5, en la cual los espesores para estas arenas varían entre 20 y 30 ft en el registro del pozo B.

La ondícula escogida para generar las trazas sintéticas de los modelos, fue una ondícula tipo Ricker de 80 Hz de frecuencia central, con un intervalo de muestreo de 2 ms y una longitud de 64 ms, estos parámetros fueron escogidos para simular las condiciones de la ventana de interés en los datos reales.

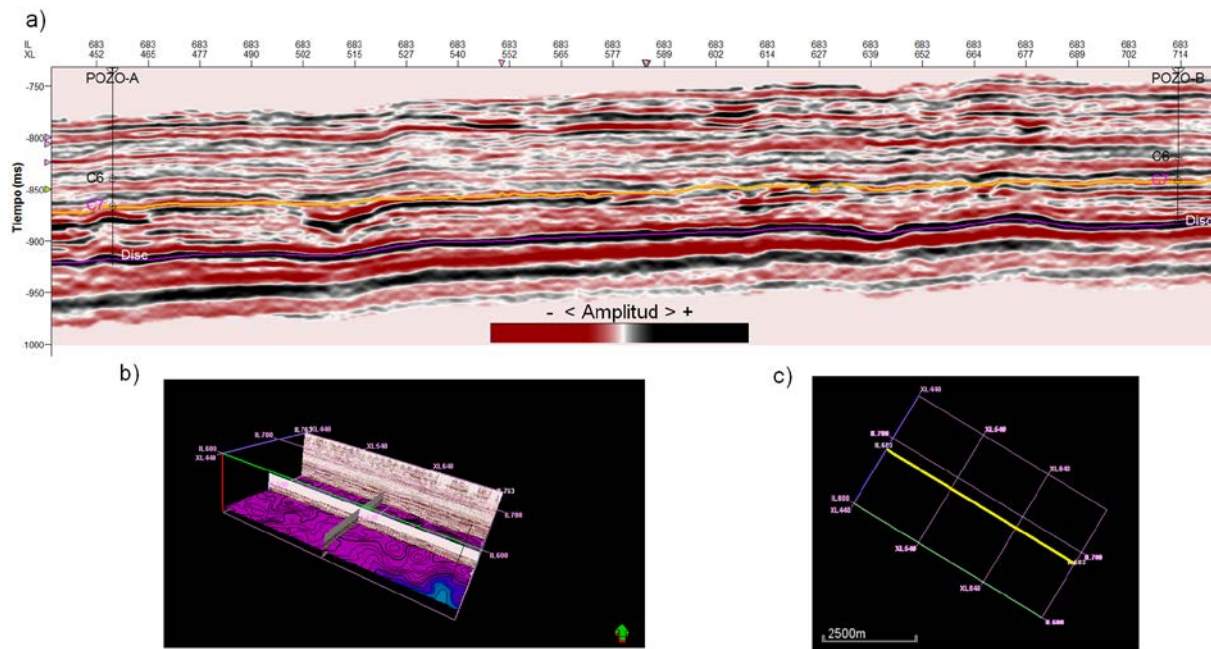
4.2.2 Datos reales.

Para probar la inversión espectral en datos reales, se seleccionó una ventana de tiempo de 200 ms en la formación carbonera, la cual está delimitada 50 ms por debajo del horizonte interpretado de la discordancia Pre-Cretácica y 150 ms por encima de este mismo horizonte.

En la figura 4-8a se muestra la sección sísmica correspondiente a la Inline 683, donde se observan los datos sísmicos ajustados a la ventana de análisis.

Figura 4-8: Ventana de análisis de datos sísmicos.

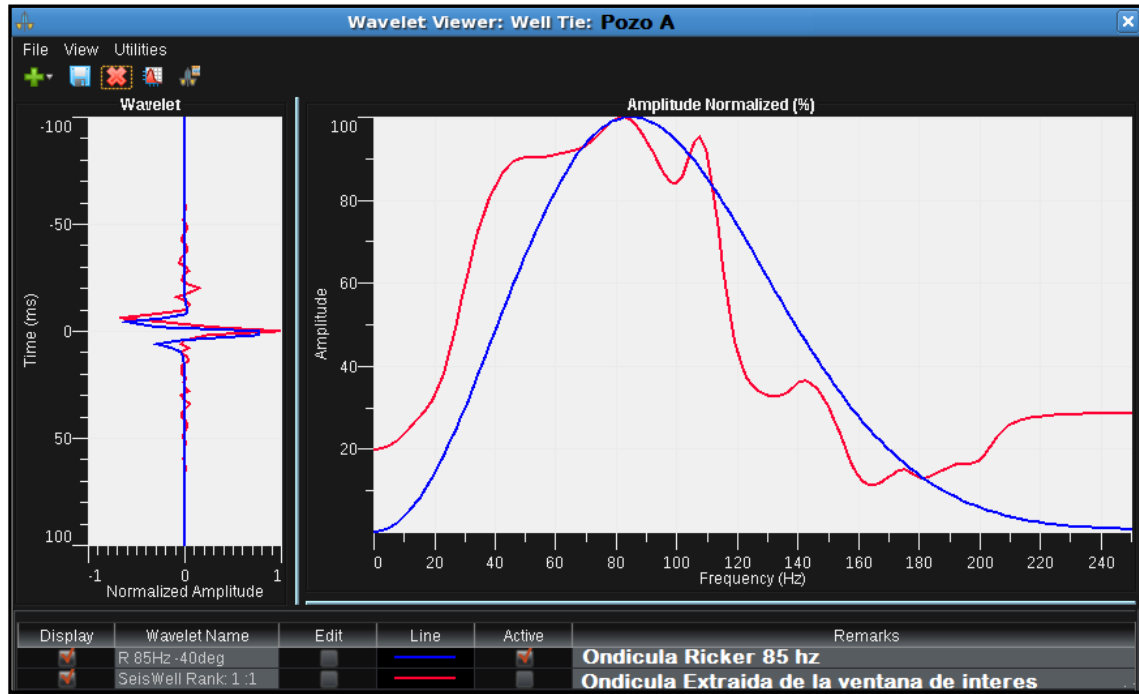
a) Sección sísmica de la Inline 683 ajustada a la ventana de análisis. b) Vista 3D del sub-volumen sísmico. c) Localización de la Inline 683 en el Sub-volumen sísmico.



En la figura 4-8b se muestra el sub-volumen sísmico, el cual está definido por 130 Xline y 165 Inline, para un total de 21450 trazas, también se observa la relación del tamaño de la ventana de análisis con respecto a toda la sísmica grabada, así como la superficie del horizonte interpretado de la discordancia Pre-Cretácica como referencia de la ubicación vertical de la ventana de tiempo.

En la parte izquierda de la figura 4-9, se observa la gráfica de la ondícula extraída de los datos sísmicos entre 600 ms y 1000 ms, en color rojo, y en color azul una ondícula tipo Ricker con frecuencia dominante de 85 Hz, en el dominio del tiempo, ambas ondículas son de fase cero con una longitud de 128 ms.

La ondícula extraída se asemeja a una ondícula Ricker de 85 Hz, además en la parte derecha de la figura 4-9 se muestra el espectro de amplitudes de ambas ondículas, donde el comportamiento de la ondícula extraída de los datos en la ventana de análisis se comporta de manera muy similar a una ondícula tipo Ricker de 85 Hz.

Figura 4-9: Ondícula extraída de datos reales vs ondícula Ricker 85 Hz.

Aunque se extrajo la ondícula de la sísmica, luego de varias pruebas tanto en el amarre sísmica-pozo como en la inversión espectral, los mejores resultados que se obtuvieron, fueron aquellos donde se utilizó la ondícula tipo Ricker de 85 Hz.

4.3 Algoritmo genético aplicado en la inversión espectral.

Para minimizar la función objetivo (ecuación 3.3), se desarrolló un algoritmo genético en Matlab R2014a, donde las variables de entrada son los arreglos de los coeficientes de reflexión y las posiciones de estos en función del tiempo dentro de la ventana de tiempo.

Para el modelo sintético 1 se utilizaron las variables de la tabla 4-1, para el algoritmo genético.

Tabla 4-1. Variables utilizadas en el AG para el Modelo 1

Tamaño de la población	80
Numero de generaciones	300
Porcentaje de mutación	0.001
Vector de los Coef. Reflexión $r(t)$	-0.2 a 0.2 (cada 0.01)
Vector $T(t)$	5 a 55 (cada 1 ms)

Para el modelo sintético 2 se utilizaron las variables de la tabla 4-2, para el algoritmo genético, el tamaño de población que se seleccionó para este modelo fue mayor debido a la complejidad del modelo, también se redujo el espacio de búsqueda en el arreglo de las posiciones de los coeficientes de reflexión $T(t)$, debido a que luego de varias pruebas se observó que el AG respondía mucho mejor cuando se reducía el espacio de búsqueda de esta variable.

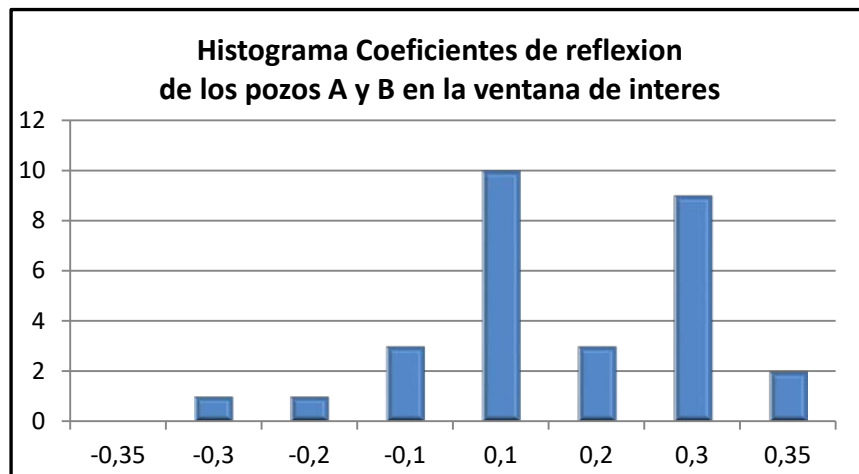
Tabla 4-2. Variables utilizadas en el AG para el Modelo 2

Tamaño de la población	100
Numero de generaciones	300
Porcentaje de mutación	0.001
Vector de los Coef. Reflexión $r(t)$	-0.2 a 0.2 (cada 0.01)
Vector $T(t)$	4 a 40 (cada 1 ms)

Para aplicar el AG en la inversión espectral de datos reales seleccionaron las variables que se utilizaron en el AG con base en los espesores vistos en la figura 4-5 y en los coeficientes de reflexión calculados a partir de la información de los registros de los pozos A y B.

En la figura 4-10 se observa el histograma de los coeficientes de reflexión calculados para los pozos A y B, el cual se tuvo en cuenta para definir el espacio de búsqueda para la variable de entrada $r(t)$, los coeficientes de reflexión toman valores entre -0.35 y 0.35, los cuales serán los límites para la variable $r(t)$ en el AG.

Figura 4-10: Histograma coeficientes de reflexión Pozo A y B.



La tabla 4-3 muestra las variables utilizadas para el algoritmo genético en datos reales. Se incrementó la variable que define el número de generaciones y el tamaño

de la población, lo cual incremento la eficiencia del algoritmo genético en la búsqueda del máximo global de la función objetivo.

Tamaño de la población	120
Numero de generaciones	600
Porcentaje de mutación	0.001
Vector de los Coef. Reflexión $r(t)$	-0.35 a 0.35 (cada 0.01)
Vector de los espesores $T(t)$	1- 30 (cada 1 ms)

Tabla 4-3. Variables utilizadas en el AG para datos reales

Cuando se aplicó el AG en la inversión espectral para los modelos sintéticos y los datos reales, se definió un valor para $\alpha_e = 0.5$ y $\alpha_o = 0.5$, esto quiere decir que la componente par y la componente impar tienen la misma influencia en la función objetivo (ecuación 3.3).

4.4 Interpolación basada en lógica difusa aplicada en sísmica.

Para implementar la interpolación en datos sísmicos se desarrolló un código en el software Matlab R2014a (Anexo B), en el cual la variable de entrada está definida por los datos sísmicos 3D en formato SEG-Y (Archivo de formato estándar para almacenar datos sísmicos), de la variable de salida es un cubo 3D también en formato SEG-Y con un BIN de tamaño del doble de la resolución original.

La metodología utilizada para la interpolación se muestra en la figura 4-11, en la cual primero se realiza un análisis del comportamiento de los datos sísmicos 3D, de donde se obtiene la dirección en la cual los datos tienen mayor tendencia, en otras palabras, se analiza cada pixel de los mapas de amplitud extraídos de los datos sísmicos y se calcula la diferencia con los pixeles cercanos, esto se realiza para generar las funciones de pertenencia las cuales son necesarias para definir las reglas de interpolación que el algoritmo necesita para calcular la amplitud del BIN interpolado.

Para calcular la dirección de tendencia de los datos se generó un mapa de la variable amplitud (*time slice*) a 840 ms, luego se generó un mapa de la misma variable (*time slice*) a 838 ms, y otro mapa (*time slice*) a 842 ms, la superposición de estos tres mapas conforman para cada BIN o pixel del mapa, una traza de 3 muestras equivalentes a 6 ms (como se muestra en el esquema de la figura 4-12), a la cual se le calculó la diferencia con sus trazas vecinas. Luego se seleccionó la dirección en la cual la diferencia es mínima, posteriormente se generó un mapa con esta dirección (figura 4-14) y se calcularon las estadísticas básicas (tabla 4-4) con las cuales se generaron las funciones de pertenencia y las reglas difusas.

Figura 4-11: Metodología de la interpolación basada en lógica difusa.

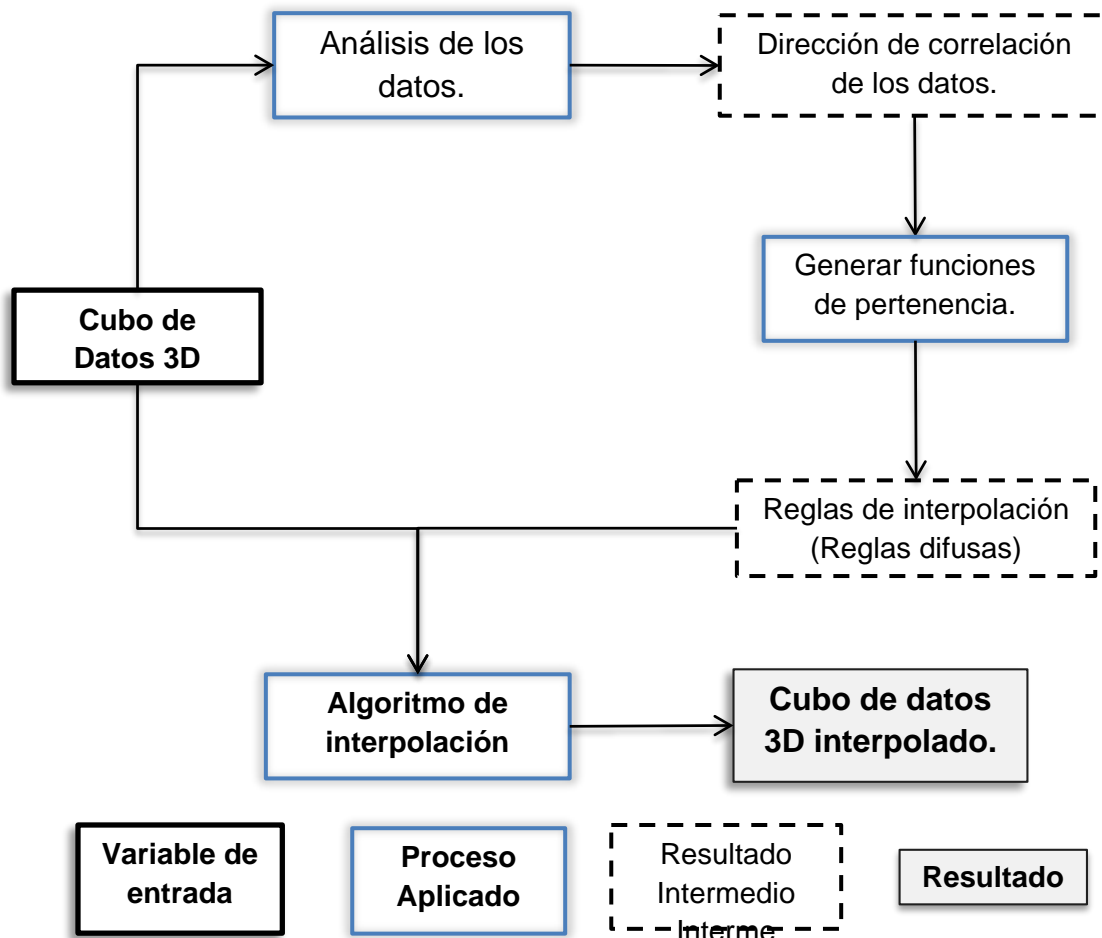
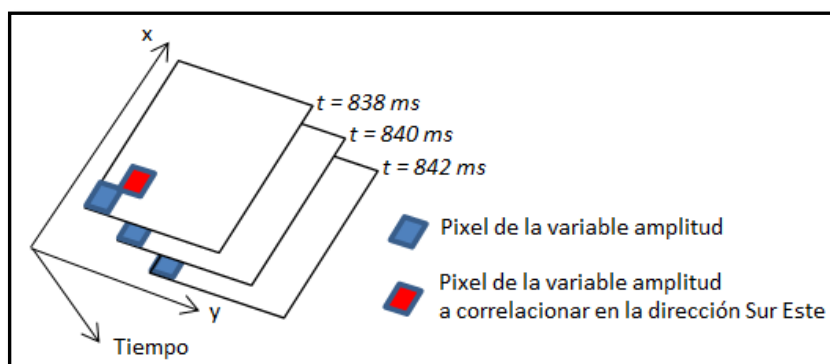


Figura 4-12: Esquema para el cálculo del mapa de dirección en la cual la diferencia es mínima.



El algoritmo de interpolación utiliza tres direcciones de correlación entre píxeles (a , b , c) como se muestra en la figura 4-13b, en cada dirección se calcula el valor absoluto de la diferencia, estas son las variables de entrada para calcular los valores de los píxeles interpolados.

La dirección horizontal no se utiliza en el cálculo de los píxeles interpolados porque el algoritmo evita inferir valores a partir de información interpolada, por ejemplo en la figura 4-13a, se tienen los BIN originales con las etiquetas en mayúscula, las cuales representan las amplitudes originales de los datos sísmicos, y en minúscula se tienen los BIN interpolados, nótese que cuando se calcula el valor interpolado del BIN “ xy ”, se tendría en cuenta otra dirección en la cual hay BIN previamente interpolados.

Teniendo en cuenta la metodología propuesta por Souverville S. et al., 2015, en interpolación de imágenes digitales basada en lógica difusa, se utilizó el siguiente procedimiento:

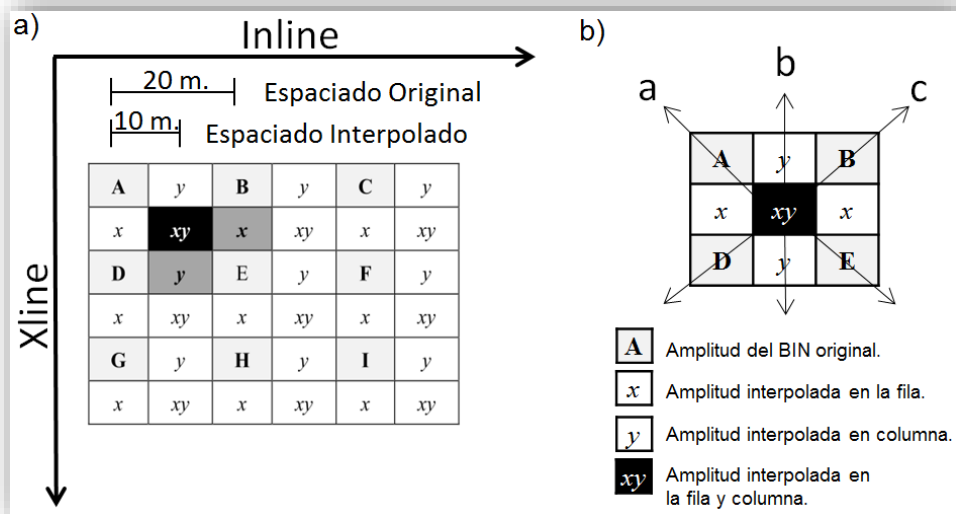
1. Se extrae una matriz equivalente al mapa de amplitudes para cada tiempo del cubo.
2. Se genera la matriz que contendrá los BIN originales e interpolados para cada una de las matrices del paso anterior, como se muestra en la figura 4-13a.
3. Se interpola linealmente las filas y columnas de los bordes de cada matriz, esto quiere decir que el BIN interpolado será el promedio de las amplitudes en la dirección de la fila o columna que se esté interpolando.
4. Se interpola el BIN “ x ” en la primera fila a interpolar usando las **amplitudes originales** A, B, C, D, E y F.
5. Se interpola la amplitud del BIN “ y ” en la primera columna interpolada usando las **amplitudes originales** A, B, D, E, G y H.
6. Se interpola la amplitud del BIN “ xy ”, usando los BIN A, B, D, E, y dos BIN previamente interpolados (BIN “ y ” por encima y por debajo del BIN “ xy ”).
7. Finalmente se unen cada una de las matrices generadas para cada tiempo del cubo y se escribe el archivo sísmico de salida en formato SGY.

Para obtener el valor interpolado de cada BIN se generan las reglas de interpolación con base en el análisis de tendencia de los datos, el cual se realizó calculando un mapa que expresa la dirección en la cual la diferencia es menor con respecto al BIN más cercano, por medio de un algoritmo programado en el software Matlab R2014a.

A continuación se describen las reglas de interpolación que se utilizaron para calcular el valor de la amplitud del BIN interpolado.

Figura 4-13: Metodología de interpolación de imágenes sísmicas.

a) BIN involucrados en una ventana de 6x6. b) Direcciones de correlación principal entre los BIN en una ventana de 3x3.



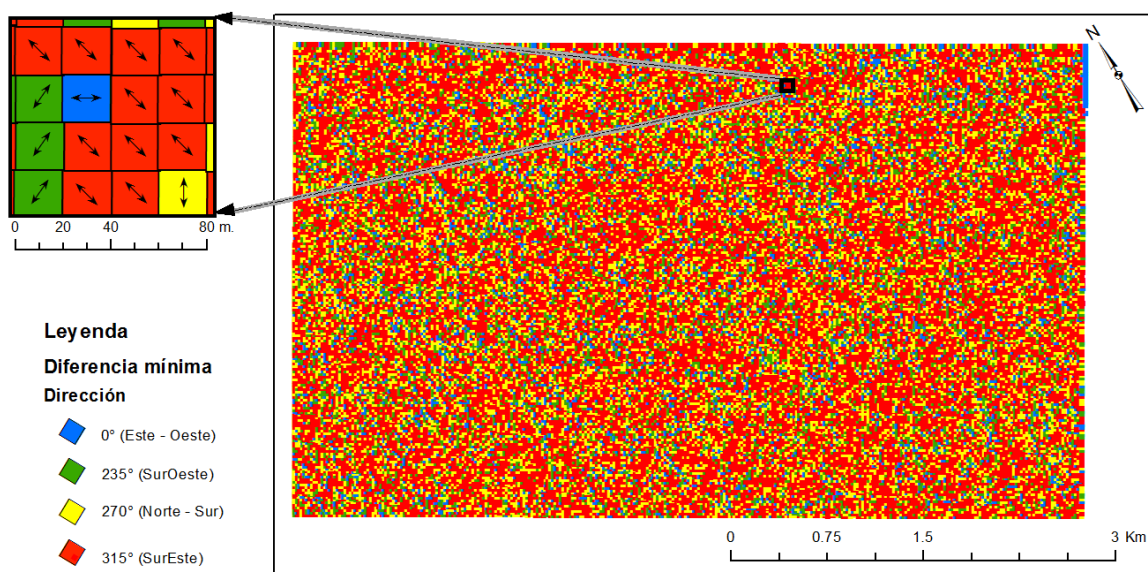
En la parte superior izquierda de la figura 4-14, se muestra una ampliación del mapa obtenido del análisis de tendencia de los datos, de 4 x 4 pixeles dentro de los cuales las flechas indican en qué dirección su diferencia es la mínima con respecto al pixel más cercano, en otras palabras el mapa de la parte derecha de la figura 4-14 expresa en colores cual es la tendencia general del comportamiento de las amplitudes.

De acuerdo al resumen estadístico de la tabla 4-4 y el mapa de la figura 4-14, podemos definir que la dirección en la cual los datos tienden a tener similitud en su amplitud es Noroeste – Sureste (Azimut 315°), la cual en la ventana de interpolación de 3x3 BIN (figura 4-15c) es la dirección (a) con un 55%, por lo tanto para el término “ α_3 ” de la figura 4-15a, se le asignó un valor de 0.7, esto quiere decir que esta dirección tendrá mayor peso en la interpolación, ya que una diferencia en los pixeles originales en la dirección (a) debe ser menor al 70 % del valor absoluto de la variación de la amplitud en la ventana de análisis (amplitud máxima en el mapa de análisis menos el valor de la amplitud mínima) para que pertenezca a la función de pertenencia baja. Por otra parte, los datos muestran que el 24 % tienen una tendencia norte-sur, la cual es la dirección (b) en la venta de interpolación, por lo tanto al término “ α_2 ” se le asignó el valor de 0.5 y 0.3 para el término “ α_1 ” de la figura 4-15a.

La figura 4-15b muestra las reglas difusas que se utilizaron para el cálculo de los BIN interpolados, donde las reglas difusas 1 y 2 registran valores cercanos a 1 cuando la correlación es grande en una dirección, mientras la correlación en las otras direcciones son bajas (≈ 0), en cualquiera de los dos casos la amplitud interpolada será el promedio de los valores de amplitud original en la dirección donde la correlación sea alta $((A1 + A7)/2$ o $(A3 + A5)/2$ según la figura 4-15c). La regla difusa 3 calcula el valor interpolado en $((A1 + A7 + A3 + A5)/4$ según la figura 4-15c), si las diferencias en las direcciones a y c son muy bajas y la diferencia en la dirección b es alta. Por último la regla difusa 4 calcula la amplitud interpolada como un promedio de las amplitudes involucradas en la dirección b $((A2 + A6)/2$ según la figura 4-15c).

Figura 4-14: Mapa diferencia mínima.

En este mapa se expresa la dirección en la cual la diferencia es mínima de cada pixel con respecto a sus pixeles cercanos para un mapa (*time slice*) a 840 ms.



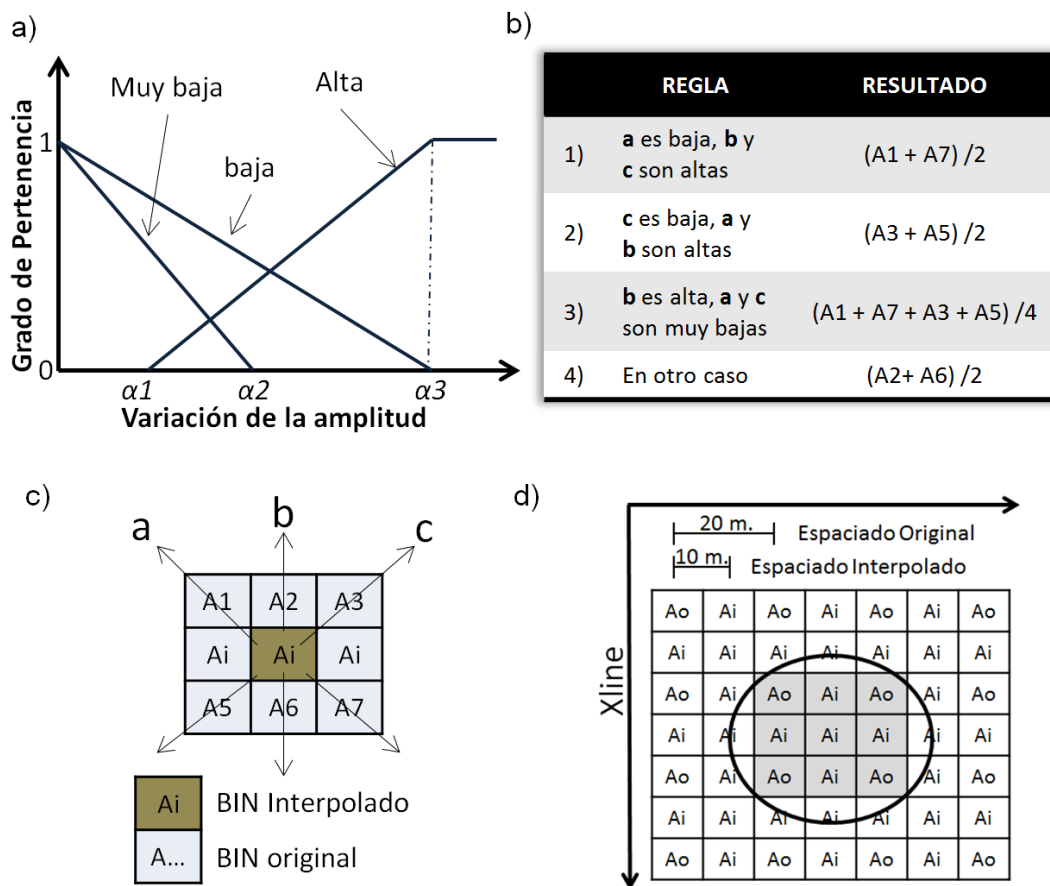
El resumen estadístico del mapa de la figura 4-14 se muestra en la tabla 4-4.

Tabla 4-4. Resumen estadístico del mapa de diferencias

Dirección	Nro. de Píxeles	Porcentaje
Este - Oeste (0°)	4357	7.68%
Sur-Oeste (235°)	7690	13.56%
Norte - Sur (270°)	13564	23.92%
Sur-Este (315°)	31086	54.83%
TOTAL	56697	100%

Figura 4-15: Funciones de pertenencia y Reglas de interpolación.

a) Funciones de pertenencia. b) Reglas difusas para la interpolación. c) Ampliación de una ventana de 3x3. d) Esquema de un time slice de 7x7.



4.5 Cálculo de atributos sísmicos

Se realizó el cálculo de tres atributos sísmicos, como herramienta para identificar los estratos finos presentes en la ventana de interés comprendida entre el tope de C7 y la discordancia Pre-Cretácica.

Primero se calcularon los atributos de amplitud RMS y Sweetness sobre el cubo original con el fin de evaluar la sensibilidad y respuesta de estos atributos a los aspectos estratigráficos del área de estudio.

Luego se seleccionó el atributo de varianza por su utilidad para realzar discontinuidades estructurales como los bordes de los canales, fallas y fracturas que pudieran estar presentes en el área.

Los atributos se calcularon con ventanas de tiempo cortas y largas con el fin de seleccionar los mejores parámetros en el cálculo de los atributos que se muestran en el capítulo 5.4. Con base en este análisis se escogió para el atributo de amplitud RMS una ventana de 10 ms, para el atributo “Sweetness” se utilizó una ventana de 12 ms y para el atributo de varianza un tamaño de 12 muestras en una ventana de tiempo de 6 ms.

5. Discusión de resultados.

5.1 Modelos sintéticos

Para comparar los resultados obtenidos por el algoritmo con las variables de entrada, se generaron dos modelos sintéticos con distintas propiedades, la magnitud de los coeficientes de reflexión y el número de capas pero con un periodo de muestreo de 2 ms para los dos modelos. Las propiedades estimadas al igual que las propiedades iniciales para el Modelo 1 se pueden observar en la tabla 5-1, donde se presenta en las dos columnas de la izquierda, las propiedades iniciales del modelo y en las dos columnas de la derecha las propiedades estimadas por el AG en la inversión espectral.

Tabla 5-1. Resultados del AG en la inversión espectral para el Modelo 1

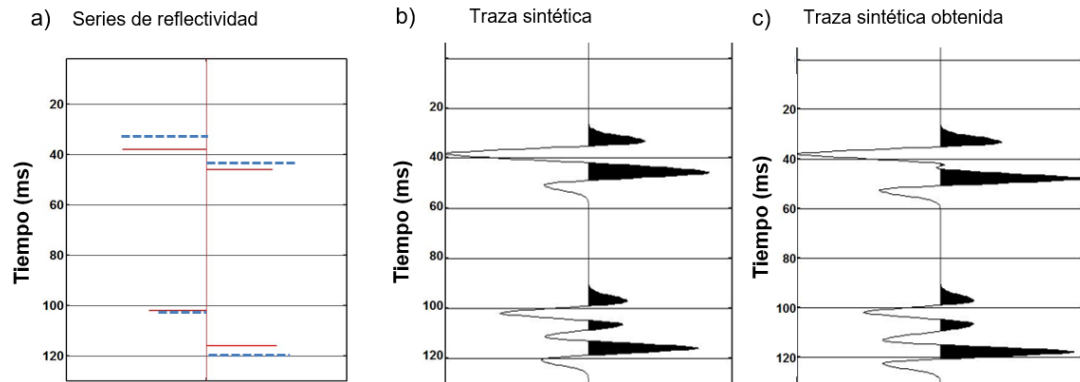
PROPIEDADES DEL MODELO 1		POSICION EN LA VENTANA DE TIEMPO	PROPIEDADES ESTIMADAS PARA EL MODELO 1		POSICION ESTIMADA EN LA VENTANA DE TIEMPO	DIFERENCIA	ERROR DE LA POSICION
r(t)	T(ms)	(ms)	r(t)	T(ms)		r(t)	T(ms)
-0.19	38	38	-0.2	38	38	0.01	0
0.15	8	46	0.2	10	48	-0.05	-2
-0.13	56	102	-0.11	54	102	-0.02	0
0.16	14	116	0.19	16	118	-0.03	-2

Los resultados muestran que el AG en la inversión espectral para el Modelo 1, soluciona la posición de los coeficientes de reflexión con un error en promedio de 2 ms, en un tiempo de 2.5 s. siempre y cuando se restrinja la posición de la primera capa. Cuando no se restringe la posición de la primera capa en todos los individuos de la población inicial, el AG tarda 3.5 segundos en encontrar la solución con un error promedio de 6 ms equivalentes a 3 muestras.

El algoritmo puede resolver grandes contrastes de espesores, como un estrato fino menor a 8 ms que se encuentre por encima y por debajo de una capa gruesa mayor a 40 ms. En la figura 5-1a se puede observar la serie de reflectividad original en color rojo, y en color azul se observa la serie de reflectividad resultado de la inversión. Se observa que la magnitud de los coeficientes de reflexión de la serie obtenida de la inversión espectral, cambia con respecto a la original entre 0.02 y -0.02, lo cual es un error aceptable debido a que la forma de la traza no cambia considerablemente, como se puede observar al comparar la traza sintética original, producto de la convolución de la serie de reflectividad original del Modelo 1 y una ondícula Ricker de 80 Hz (figura 5-1b), y la traza sintética obtenida de la convolución entre la serie de reflectividad estimada por el AG en la inversión espectral y la misma ondícula utilizada en la generación de la traza sintética original (figura 5-1c).

Figura 5-1: Resultados para el Modelo 1.

a) Serie de reflectividad original (Rojo) vs serie de reflectividad estimada (Azul). b) Trazas sintéticas del Modelo 1 con propiedades conocidas y una ondícula Ricker de 80 Hz. c) Trazas sintéticas resultado de la convolución entre la serie de reflectividad estimada y una ondícula Ricker de 80hz.



Para evaluar la capacidad de resolver estratos finos en una ventana de tiempo que no tenga grandes contrastes de espesores se elaboró el Modelo 2, el cual tiene contrastes de espesores en un rango de 4 a 20 ms, y una serie de reflectividad más larga, en una ventana de tiempo de 128 ms.

En la tabla 5-2 se encuentran las propiedades iniciales del Modelo 2 y las propiedades estimadas a partir del AG en la inversión espectral que se utilizaron para ejecutar el algoritmo al Modelo 2.

Tabla 5-2. Resultados del AG en la inversión espectral para el Modelo 2

PROPIEDADES DEL MODELO 2		POSICION EN LA VENTANA DE TIEMPO	PROPIEDADES ESTIMADAS PARA EL MODELO 2		POSICION ESTIMADA EN LA VENTANA DE TIEMPO	DIFERENCIA	ERROR DE LA POSICION
r(t)	T(ms)	(ms)	r(t)	T(ms)	(ms)	r(t)	T(ms)
-0.15	20	20	-0.15	18	18	0	2
0.18	5	25	0.20	8	26	-0.02	1
-0.12	15	40	-0.15	14	40	0.03	0
0.18	6	46	0.16	6	46	0.02	0
-0.11	15	61	-0.13	16	62	0.02	1
0.15	5	66	0.18	7	69	-0.03	3
-0.12	17	83	-0.14	19	88	0.02	5
0.14	8	91	0.16	11	99	-0.02	8
-0.13	18	109	-0.18	18	117	0.05	8

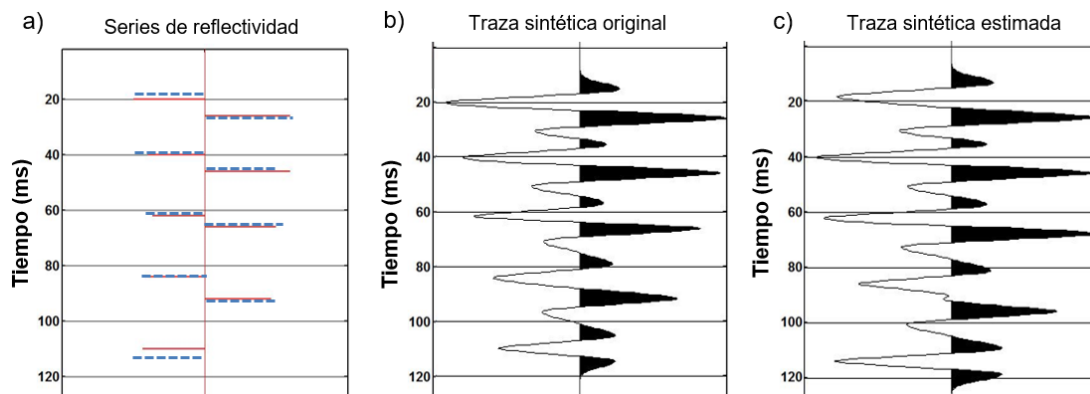
El AG tardó 3.5 s en minimizar la ecuación 3.3 en el Modelo 2, las propiedades obtenidas que se muestran en el Modelo 2 indican que las posiciones de los

coeficientes de reflexión en la ventana de tiempo de análisis tienen errores de 2 a 3 ms en los primeros 100 ms de la ventana de tiempo (teniendo en cuenta que el periodo muestreo es de 2 ms es un error aceptable). El error se incrementa a 6 ms en la parte final del borde de la ventana de análisis, esto se debe al efecto de borde que puede presentar el AG en la inversión espectral.

En la figura 5-2a se puede observar la serie de reflectividad original del Modelo 2 en color rojo, y la serie de reflectividad estimada por el algoritmo en color azul. Se aprecia que la primera posición se conserva para las dos series de reflectividad, esto es debido a que se restringió toda la población inicial con el valor de la primera posición, luego en la segunda posición se tiene un error de 2 ms, resultado del efecto de borde que puede presentar el algoritmo, pero en las posiciones de 30 ms a 90 ms en la ventana de tiempo, las posiciones de los coeficientes de reflexión se mantienen con un error menor a 2 ms, y en la parte final de la ventana se observa un error de 6 ms debido al efecto de borde, esto confirma que el AG funciona adecuadamente en la parte media de la ventana de análisis.

Figura 5-2: Resultados para el Modelo 2.

a) Serie de reflectividad original (Rojo) vs serie de reflectividad estimada (Azul). b) Trazas sintéticas del Modelo 2 con propiedades conocidas y una ondícula Ricker de 80 Hz. c) Trazas sintéticas resultado de la convolución entre la serie de reflectividad estimada y una ondícula Ricker de 80hz.



De acuerdo a la figura 5-2b y 5-2c, las cuales muestran las trazas obtenidas de las propiedades del Modelo 2, se observa que aunque las magnitudes de los coeficientes de reflexión cambian entre el modelo con propiedades conocidas y el estimado a partir de la inversión espectral, las trazas no cambian de forma significativa de 30 a 90 ms, en los cuales el AG solucionó las posiciones de las capas del Modelo 2.

El algoritmo genético tiene un excelente desempeño para encontrar la solución más óptima en modelos sintéticos simples (3 capas) y con mayor complejidad (mayores

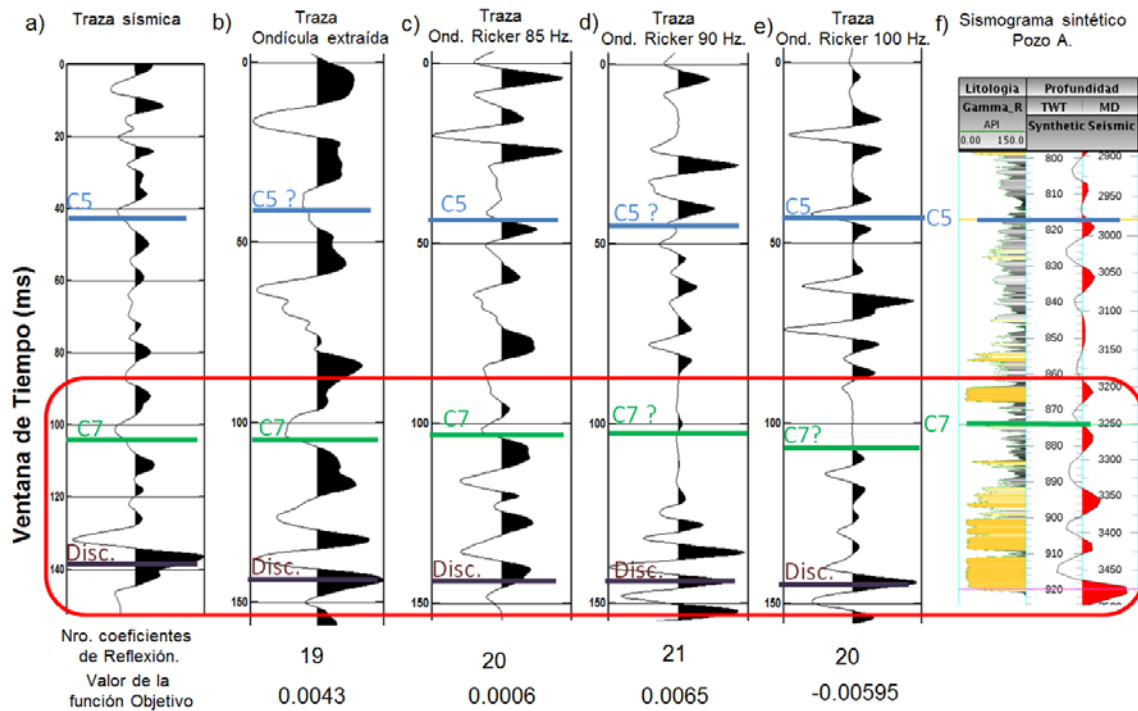
a 4 capas) en la parte media de la ventana de análisis, lo cual se debe tener en cuenta al aplicarlo en datos reales.

5.2 Datos reales - Formación Carbonera

Se aplicó la inversión espectral optimizada con el AG en la traza cercana al Pozo-A, en el cruce de la Inline 708 con la Xline 457. También se controló la población inicial con la posición de C5, C7 y la Discordancia lo cual mejoro significativamente el rendimiento del AG para encontrar una solución. Posteriormente se ejecutó el AG con distintas ondículas (figura 5-3).

Figura 5-3: Inversión espectral para una traza en el sub-volumen extraído.

a) Traza sísmica en la Inline 708 con Xline 457. b) Traza obtenida de la inversión espectral utilizando la ondícula extraída de la sísmica. c) Traza obtenida de la inversión espectral utilizando la ondícula Ricker de 85 Hz. d) Traza obtenida de la inversión espectral utilizando la ondícula Ricker de 90 Hz. e) Traza obtenida utilizando la ondícula Ricker de 100 Hz. f) Traza sintética para el Pozo-A.



En la figura 5-3a se muestra fracción de la traza sísmica cercana al pozo A desde 773 ms a 923 ms (150 ms), donde se marcan los topes de C5 y C7, la figura 5-3b muestra la traza estimada utilizando una ondícula extraída a partir de la sísmica desde 600 ms a 950 ms, esta traza resuelve la posición al tope de C5, C7 y la discordancia

Pre-Cretácica, pero la forma de la traza obtenida cambia respecto a la traza original, por lo tanto esta traza se descarta para la ejecución del AG en todo el cubo de datos.

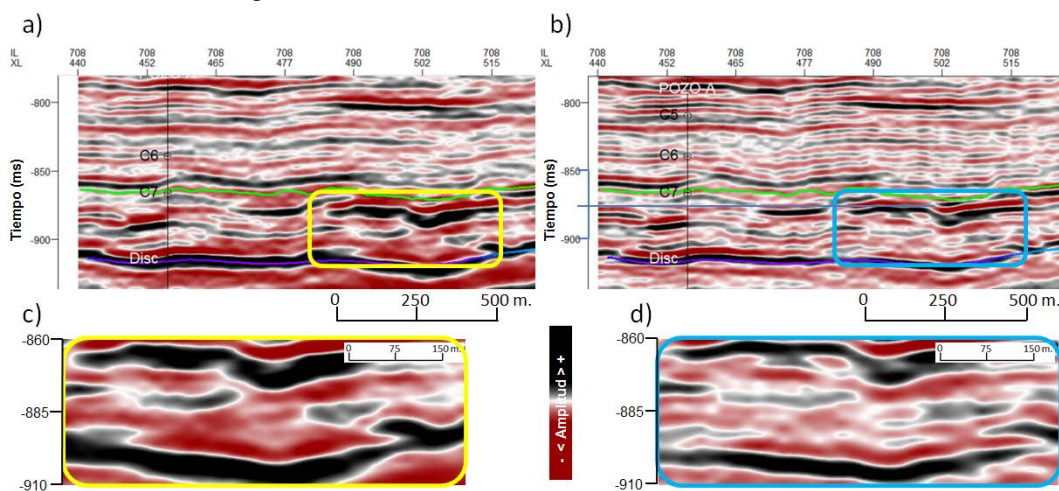
La figura 5-3d muestra la traza estimada por la inversión espectral utilizando una ondícula Ricker de 90 Hz., aunque esta traza tiene un mayor contenido de frecuencias en la parte cercana a la discordancia, la posición del tope C7 Y C5 no se resuelven al compararlos con el sismograma sintético de la figura 5-3f, por lo tanto esta ondícula se descarta para la inversión espectral.

La figura 5-3e muestra las traza obtenida utilizando una ondícula Ricker de 100 Hz de frecuencia dominante, esta traza tiene mayor contenido de frecuencias en la ventana de interés definida en el cuadro rojo de la figura 5-3 y se resuelve el tope de C5, pero el tope de C7 no lo resuelve, por lo tanto esta ondícula también se descarta en la inversión espectral.

Por otra parte, en la figura 5-3c, se resuelven los tope C5 y C7 además el contenido de frecuencia aumenta, respetando las posiciones de los principales reflectores, al comparar esta traza con el sismograma sintético de la figura 5-3f. Entre 890 y 900 ms se muestran paquetes de arena que la traza obtenida de la inversión espectral de la figura 5-3c puede delimitar. Por lo tanto se seleccionó una ondícula Ricker de 85 Hz para aplicar la inversión espectral optimizada con el AG a todo el volumen de datos sísmicos 3D.

Figura 5-4: Resultados de la inversión espectral en la Inline 708

a) Sección sísmica de la Inline 708. b) Sección sísmica de la Inline 708 resultado de la Inversión espectral. c) Ampliación del cuadro amarillo de la figura 5-4a. d) Ampliación del cuadro azul de la figura 5-4b.

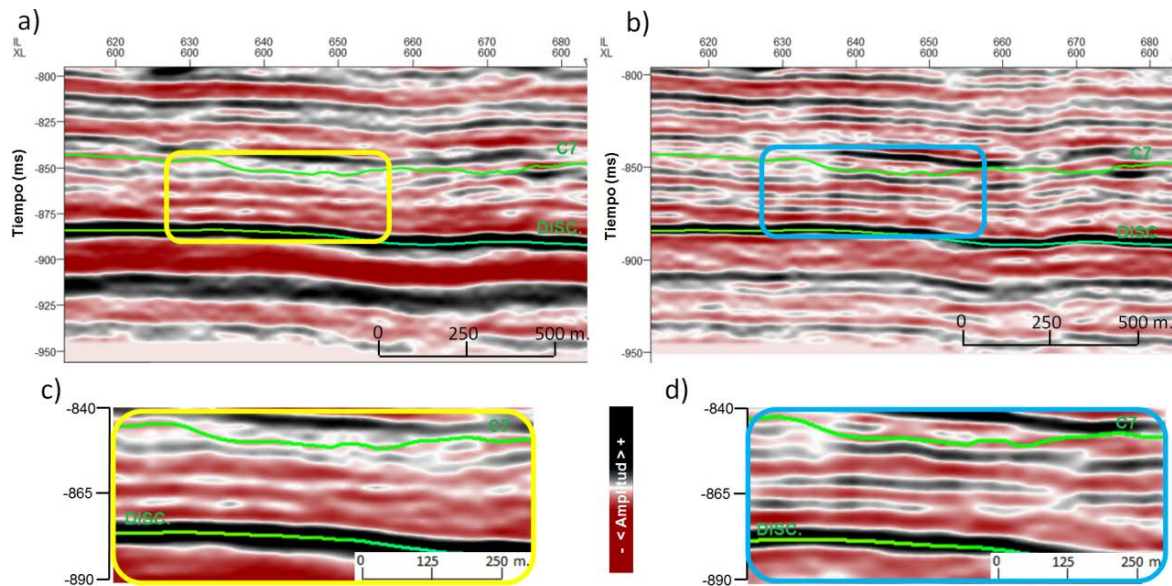


En la figura 5-4c y 5-4d se muestra un acercamiento de la sección sísmica original (recuadro amarillo sobre la sección) y la sección sísmica resultado de la inversión (recuadro azul sobre la sección) respectivamente, entre las Xlines 480 y 517, y entre 860 ms y 920 ms, claramente se observa el aumento de resolución vertical. También se observa que el algoritmo responde bien a la continuidad lateral en la dirección de las Inline ya que el tope de C7 es continuo en toda la Inline y el reflector de la discordancia PreCretacica también se puede seguir a lo largo de toda la línea.

Adicionalmente se muestra en la figura 5-4b, que la resolución sísmica en C4, C5 y C6, los cuales están presentes en la ventana a la cual se realizó la inversión espectral, mejoran con respecto a los datos originales de la figura 5-4a. Por ejemplo a 830 ms en el cruce con la Xline 465, se observa que en los datos originales existen amplitudes positivas las cuales se delimitan mejor en los datos obtenidos de la inversión espectral.

Figura 5-5: Resultados de la inversión espectral en la Xline 600

a) Sección sísmica de la Xline 600. b) Sección sísmica de la Xline 600 resultado de la Inversión espectral. c) Ampliación del cuadro amarillo de la figura 5-5a. d) Ampliación del cuadro azul de la figura 5-5b.



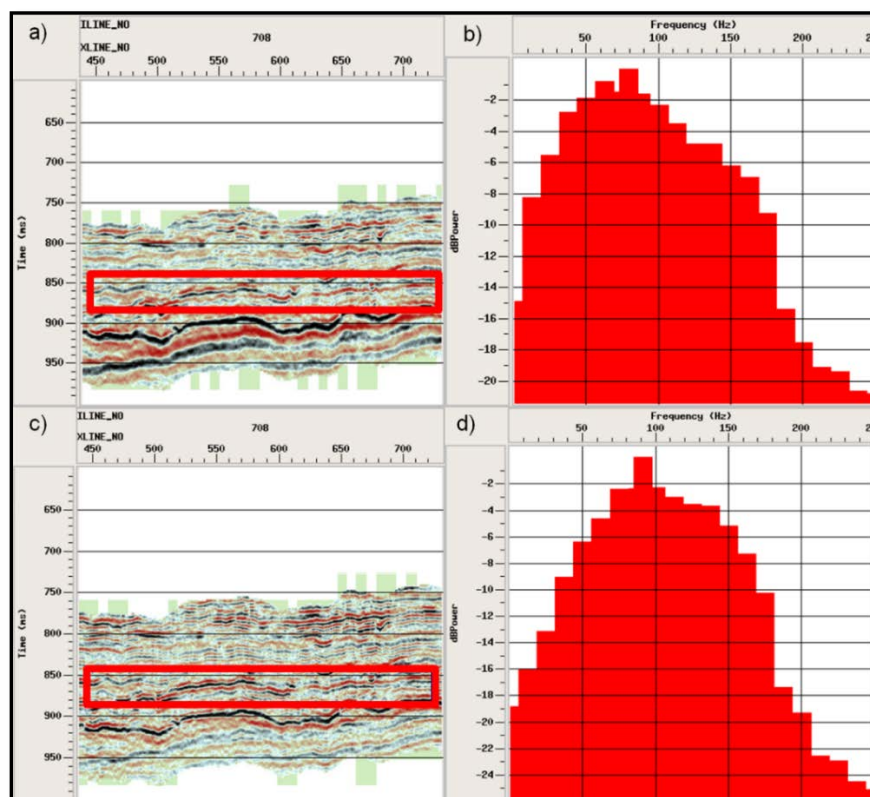
La figura 5-5d muestra una ampliación de la sección sísmica resultado de la inversión espectral (recuadro azul sobre la figura 5-5b), entre las Inlines 628 y 658, y entre 840 ms y 890 ms, por otra parte en la figura 5-5c (ampliación del recuadro azul de la figura 5-5a), se observa que los reflectores no son continuos entre el tope de C7 y la discordancia Pre-Cretácica, a diferencia de los reflectores obtenidos de la inversión espectral donde aparecen reflectores que pueden delimitar los estratos finos presentes en el área. El reflector que aparece como uno solo en los datos originales

entre 810 ms y 825 ms, entre los CDP 620 y 680, tiene amplitudes negativas (Colores rojos) en el medio de lo que parece ser un solo reflector y que los datos estimados con la inversión se diferencian dos reflectores totalmente distintos, lo cual indica el aumento de resolución vertical luego de aplicar la inversión espectral a los datos originales.

Posteriormente, se hizo un análisis espectral para la Inline 708. En la figura 5-6a se muestra la sección sísmica de la Inline 708 del sub-volumen original con un cuadro rojo entre 840 ms y 880 ms, que representa la ventana entre el tope de C7 y la discordancia PreCretacica, y a la cual se le calculó el espectro de frecuencias (figura 5-6b), por otra parte, la figura 5-6d corresponde al espectro de frecuencia de la misma ventana pero sobre la sección sísmica del cubo resultado de la inversión espectral.

Figura 5-6: Análisis espectral de la Inline 708

a) Sección sísmica de la Inline 708. b) Espectro de frecuencia para la ventana del cuadro rojo de la figura 5-6a. c) Sección sísmica de la Inline 708 para los datos resultado de la inversión espectral. d) Espectro de frecuencia para la ventana del cuadro rojo de la figura 5-6c.



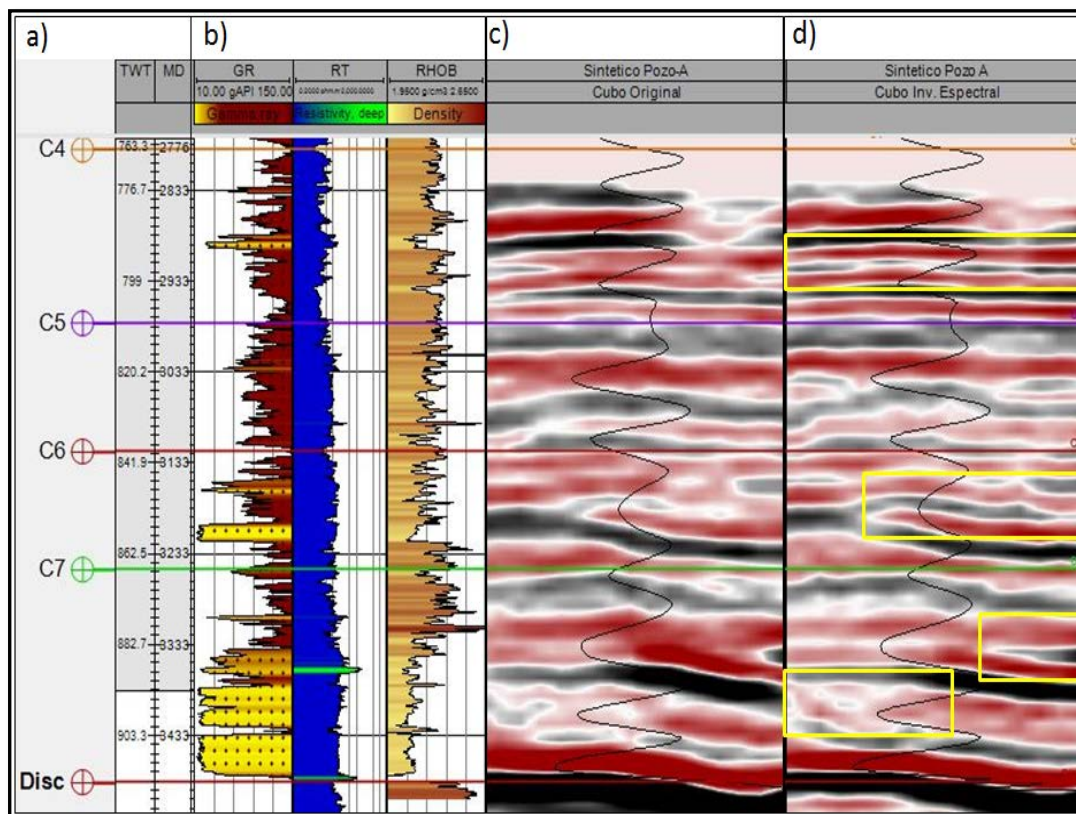
En las figura 5-6b se observa que la frecuencia dominante está alrededor de 80 Hz. para una ventana entre 840 ms y 890 ms y en la figura 5-6d, la frecuencia dominante

esta entre 85 y 95 Hz., por otra parte, el ancho de banda no se modifica pero el contenido de frecuencias altas es mayor en el cubo resultado de la inversión espectral (figura 5-6d), lo cual mejora la resolución vertical.

Para cuantificar la resolución vertical, se utilizó una velocidad intervalica de 2190 m/s (7184.95 ft/s), y una frecuencia dominante de los datos obtenidos de la inversión de 90 HZ. (Figura 5-6d), con lo cual se tiene una resolución vertical de 6.08 m (**19.95 ft**), la cual es menor que la de los datos originales (24 ft).

Figura 5-7: Resultados de la inversión espectral para trazas vecinas al Pozo-A.

a) Topes principales, escalas en tiempo y profundidad. b) Interpretación litológica del Pozo A (colores claros se asocian con arenas y colores oscuros con lutitas). c) Datos sísmicos originales en dirección de las Inline. d) Datos sísmicos invertidos en dirección de las Inline. Cuadros amarillos indican las principales diferencias.

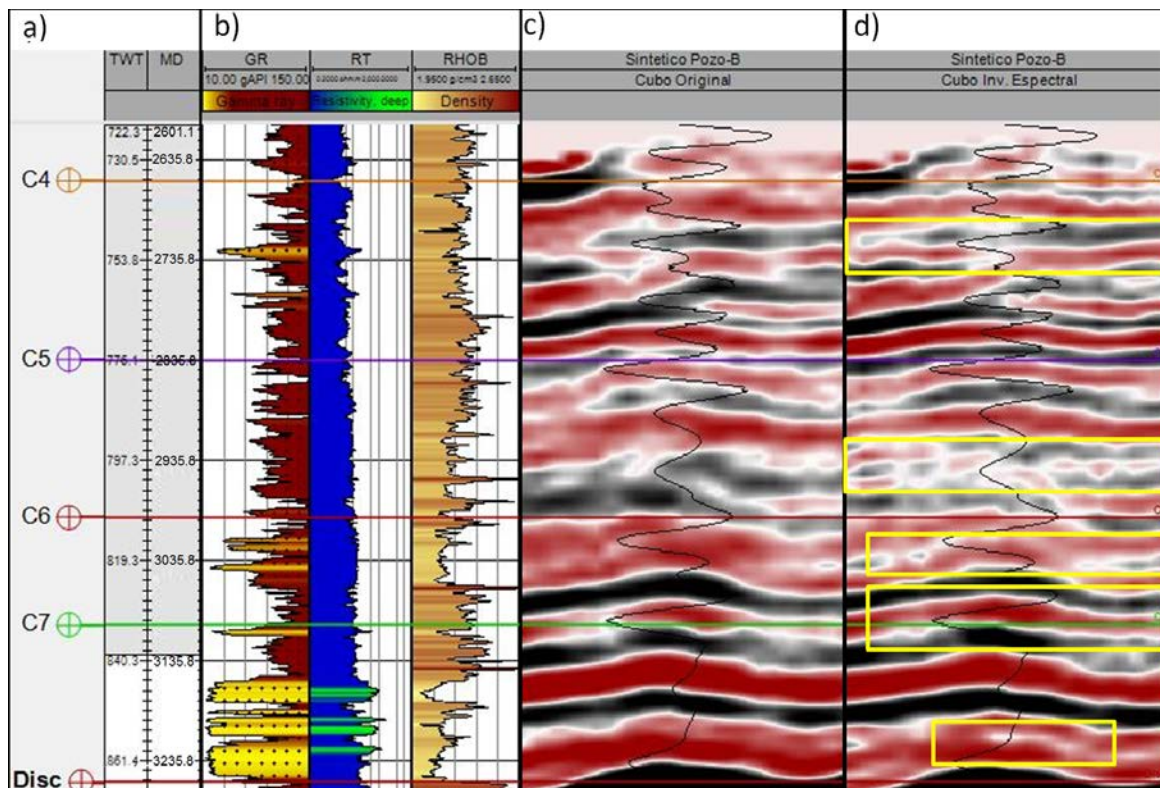


La figura 5-7d muestra la sección sísmica obtenida de la inversión a 200 metros alrededor del pozo-A, donde los reflectores de los datos invertidos resuelven los principales paquetes de arena, por ejemplo entre 842 ms y 860 ms, se observa cómo se delimitan mejor los reflectores, identificando paquetes litológicos menores a un

espesor de 24 pies(resolución sísmica del cubo original), por otra parte, en paquetes con mayor presencia de lutitas como C4 a C5, se puede identificar mejor los contrastes entre estos paquetes (780 ms a 800 ms). Los reflectores en los datos sísmicos originales que se observan en la figura 5-7c, están relacionados con paquetes más gruesos que no resuelven la posición de estratos litológicos finos que se observan en la figura 5-7b, donde los paquetes de arena en color amarillo están entre 10 ft y 30 ft aproximadamente.

Figura 5-8: Resultados de la inversión espectral para trazas vecinas al Pozo-B.

a) Topes principales, escalas en tiempo y profundidad. b) Interpretación litológica del Pozo B (colores claros se asocian con arenas y colores oscuros con lutitas). c) Datos sísmicos originales en dirección de las Inline. d) Datos sísmicos invertidos en dirección de las Inline. Cuadros amarillos indican las principales diferencias.



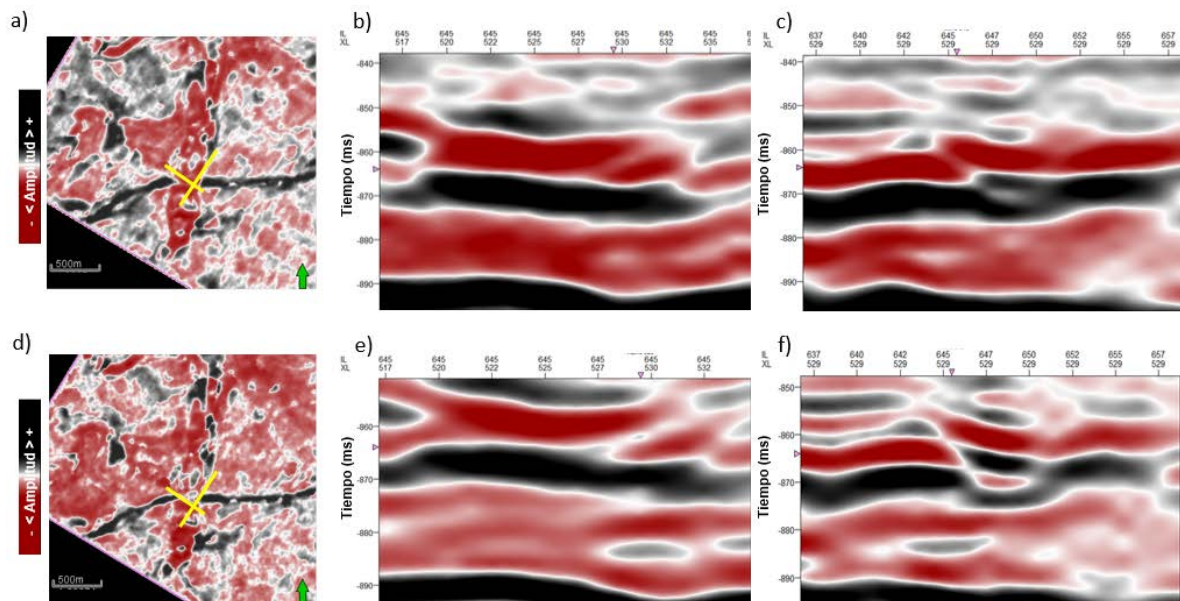
Para el caso del pozo-B, la figura 5-8d muestra un cuadro en color amarillo entre 780 ms y 805 ms, donde se puede observar que las amplitudes se diferencian mejor que en los datos originales, entre el tope de C6 y el tope de C7 (cuadro amarillo entre 810 ms y 822 ms de la figura 5-8d), se puede identificar un reflector en los datos estimados a partir de la inversión, el cual no se puede observar claramente en los datos originales de la figura 5-8c, además en la parte inferior del estrato delimitado por el tope de C7 y el tope de la discordancia PreCretacica (cuadro amarillo entre 845 ms y

852 ms), el AG trata de solucionar la posición del estrato de arenas que están cerca a la discordancia pero no es posible porque el espesor de esta capa no es lo suficientemente grande para que el algoritmo de inversión espectral lo solucione.

Se analizó el comportamiento de las amplitudes en los datos obtenidos con dos mapas de la variable amplitud (*time slices*) dentro de la ventana de tiempo comprendida entre el tope de C7 y la discordancia PreCretacica, el primero a 864 ms cerca al tope de C7, que se puede observar en la figura 5-9, y el segundo a 876 ms que se puede observar en la figura 5-10.

Figura 5-9: Mapas de amplitudes a 864 ms.

a) Mapa de la variable amplitud de los datos originales (*time slice*). b) Sección sísmica de la Inline 645 de los datos originales. c) Sección sísmica de la Xline 529 de los datos originales. d) Mapa de la variable amplitud de los datos obtenidos de la inversión (*time slice*). e) Sísmica de los datos obtenidos de la inversión Inline 645. f) Sísmica de los datos originales Xline 529.

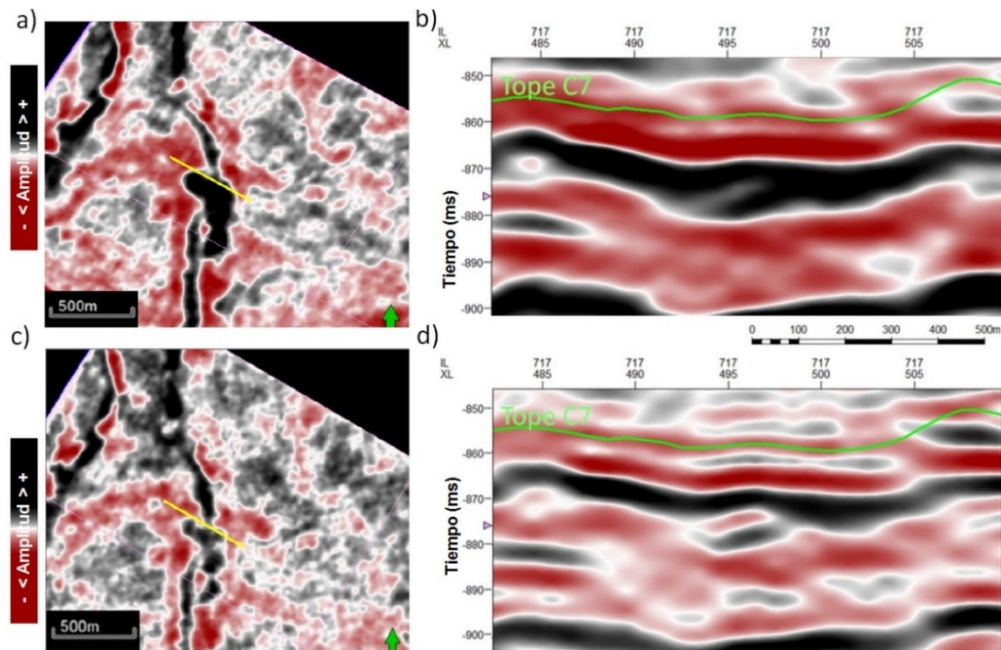


En las figuras 5-9a y 5-9d se observan los mapas de la variable amplitud de los datos originales y los obtenidos de la inversión, en los cuales los colores oscuros representan amplitudes positivas y los colores rojos amplitudes negativas, se observa que el evento sísmico representado por un color negro de este a oeste, se pierde en los datos originales (Cruce de las líneas amarillas) y en los datos invertidos aparece como un reflector independiente de amplitudes negativas en color rojo. Las figuras 5-9b y 5-9e, representan la sección sísmica de la Inline 645 (línea este-oeste en color amarillo en el mapa de la figura 5-9a), de los datos originales e invertidos, se observa que se delimita mejor en el cruce con la Xline 529, lo que podría interpretarse como

un canal. Se comparó las figuras 5-9c y 5-9f las cuales son las secciones sísmicas de los datos originales e invertidos de la Xline 529 (línea sur-norte en color amarillo en el mapa de amplitudes figura 5-9a), claramente se delimitan mejor los eventos sísmicos que se pueden apreciar en el mapa de la figura 5-9c.

Figura 5-10: Mapas de amplitudes a 876 ms.

a) Mapa de la variable amplitud de los datos originales (*time slice*). b) Sísmica de los datos originales Inline 717. c) Mapa de la variable amplitud de los datos obtenidos de la inversión (*time slice*). d) Sísmica de los datos obtenidos de la inversión Inline 717.



Para el caso del mapa de la variable amplitud a 876 ms del cubo resultado de la inversión espectral que se muestra en la figura 5-10c, se puede observar que los estratos representados por el contraste de amplitudes positivas y negativas se delimitan mejor que en el mapa de los datos originales que se muestra en la figura 5-10a, el cual tiene un área con una gran cantidad de amplitudes positivas en color negro. La línea amarilla en las figuras 5-10a y 5-10c, representa la ubicación de la sección sísmica de la Inline 717 que se puede observar en la figuras 5-10b para los datos originales y en la figura 5-10d para los datos resultado de la inversión espectral, claramente se observa que el horizonte interpretado de C7 tienen mayor continuidad en la figura 5-10d, y se delimita mucho mejor entre el cruce con las Xlines 487 y 504, a diferencia de la figura 5-10b.

En general, la característica de los datos sísmicos en la ventana de interés es la falta de continuidad de algunos reflectores, lo cual hace difícil su interpretación geológica. Los resultados de la inversión espectral muestran que además de aumentar la

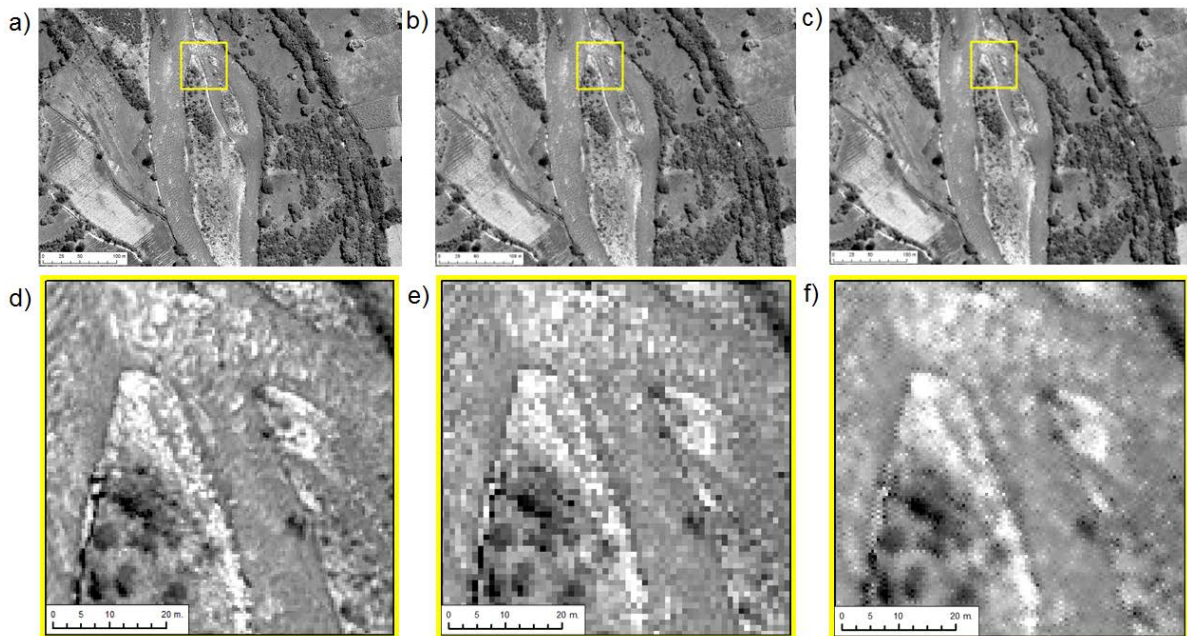
resolución vertical de 24 ft a 19.95 ft, se mejora la continuidad de los reflectores permitiendo mejorar la delimitación de estratos finos con respecto a los datos sísmicos originales.

5.3 Interpolación basada en lógica difusa – Formación Carbonera

Para evaluar este método de interpolación se utilizó una imagen satelital de alta resolución (figura 5-11a) de los llanos de Colombia tomada en el 2015 del área de estudio, la cual tiene un tamaño de pixel de 50 cm x 50 cm y un rango dinámico en el valor de su nivel digital de 247 a 1822, el cual es equivalente en la información al rango dinámico de las amplitudes en los datos sísmicos, de esta imagen se obtuvo una imagen con un tamaño de pixel de 100 cm x 100 cm (figura 5-11b), en la cual se aplicó el algoritmo de interpolación y se comparó la imagen obtenida con la original para evaluar la predicción del método de interpolación.

Figura 5-11: Interpolación aplicada a una imagen satelital.

a) Imagen con pixel de 50 cm x 50 cm. b) Imagen remuestreada con pixel de 100 cm x 100 cm. b) Imagen remuestreada con pixel de 100 cm x 100 cm. c) Imagen interpolada con pixel de 50 cm x 50 cm. d) Ampliación de la imagen original. e) Ampliación de la figura 5-11b. f) Ampliación de la figura 5-11c.



Las figuras 5-11a, 5-11b y 5-11c, muestran la imagen completa, y se observa que la diferencia no es significativa, pero cuando se hacen los acercamientos se muestra que la imagen obtenida de la interpolación (Figura 5-11f), cuya resolución espacial es

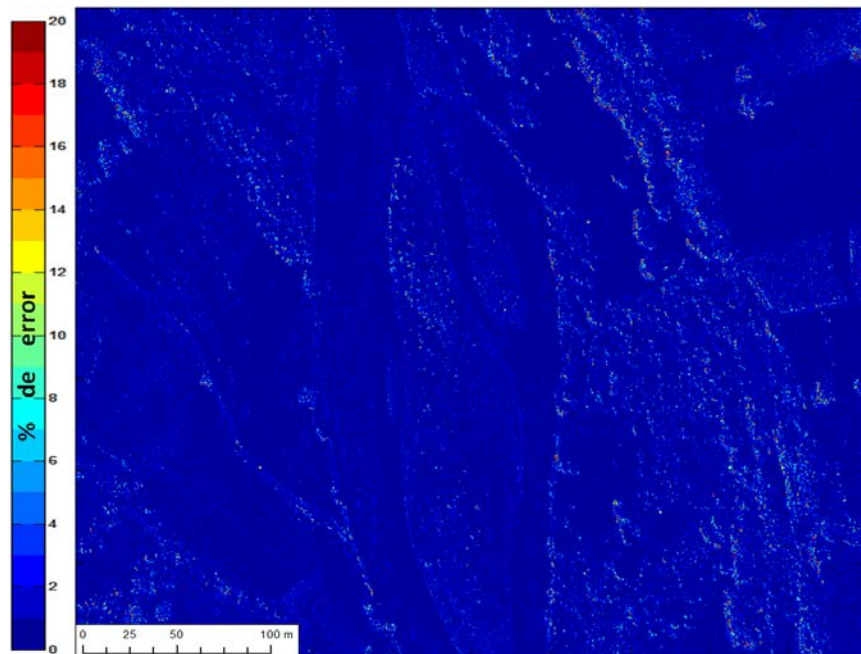
de 50 cm x 50 cm, suaviza los bordes de los elementos geográficos de la imagen. Al tener mayor resolución horizontal se puede delimitar mejor elementos como ríos, islas, bordes de los ríos y otros elementos presentes en la imagen.

En la figura 5-11d se muestra una ampliación de la imagen original (pixel de 50 cm x 50 cm), en la cual se observan canales de 15 a 50 metros de ancho. Se puede observar en la figura 5-11f como el algoritmo suaviza los bordes con respecto a la figura 5-11e, la cual muestra la misma ampliación que la figura 5-11d en la imagen de pixel de 100 cm x 100 cm.

Para cuantificar el error del algoritmo se normalizaron los valores de cada imagen en un rango de 0 a 1, y se calculó el error de cada pixel de la imagen interpolada con respecto a la imagen original.

La figura 5-12 expresa el error porcentual de cada pixel de la imagen interpolada con respecto a la imagen original (pixel de 50 cm x 50 cm.), se observa que la mayor parte de la imagen de la figura 5-12 contiene errores menores al 4% (Colores azules) en la predicción del pixel original, aunque hay valores que tienen un error hasta del 20% en el valor obtenido por la interpolación (píxeles en colores rojos en la figura 5-12), con respecto al valor original, estos valores representan el 20% de los píxeles interpolados.

Figura 5-12: Error del algoritmo de interpolación.



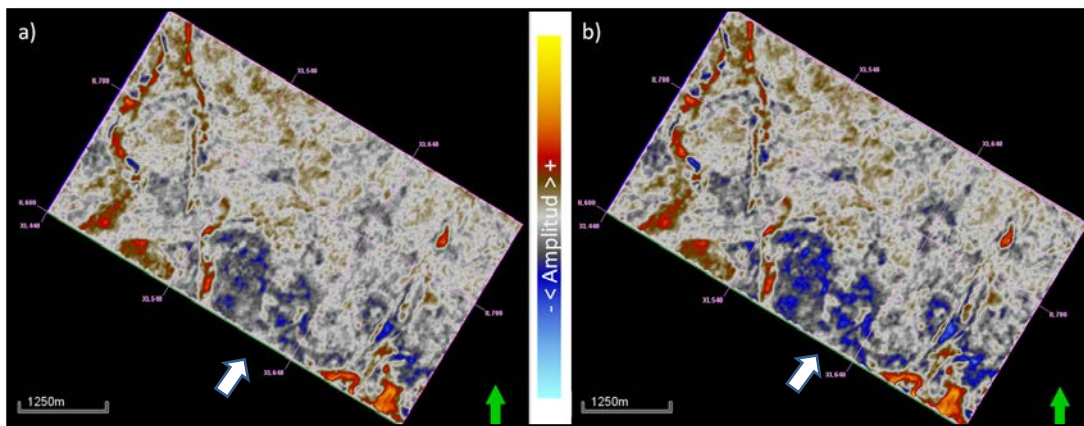
El valor promedio del error en la imagen interpolada es de aproximadamente el 4%, y se encontró que hay errores altos de hasta un 20% en aquellas áreas donde el

algoritmo no puede encontrar un valor cercano al real, estas áreas coinciden con los bordes de los canales y aquellas áreas que tienen variaciones de altura, en las cuales es difícil para el algoritmo calcular un valor aproximado al real. Por lo tanto en términos generales, para el caso de una imagen digital el algoritmo puede predecir el valor digital de la imagen original en un 80 %.

Posteriormente se aplicó el algoritmo de interpolación al cubo producto de la inversión espectral y al cubo original de datos, luego se generaron mapas de la variable amplitud en la ventana de tiempo de interés y se evaluaron las diferencias entre el original y el interpolado.

Figura 5-13: Mapas de amplitud para un tiempo de 876 ms.

a) Mapa de amplitud (*time slice*) de la inversión espectral. b) Mapa de amplitud (*time slice*) de la interpolación aplicada a la inversión espectral.



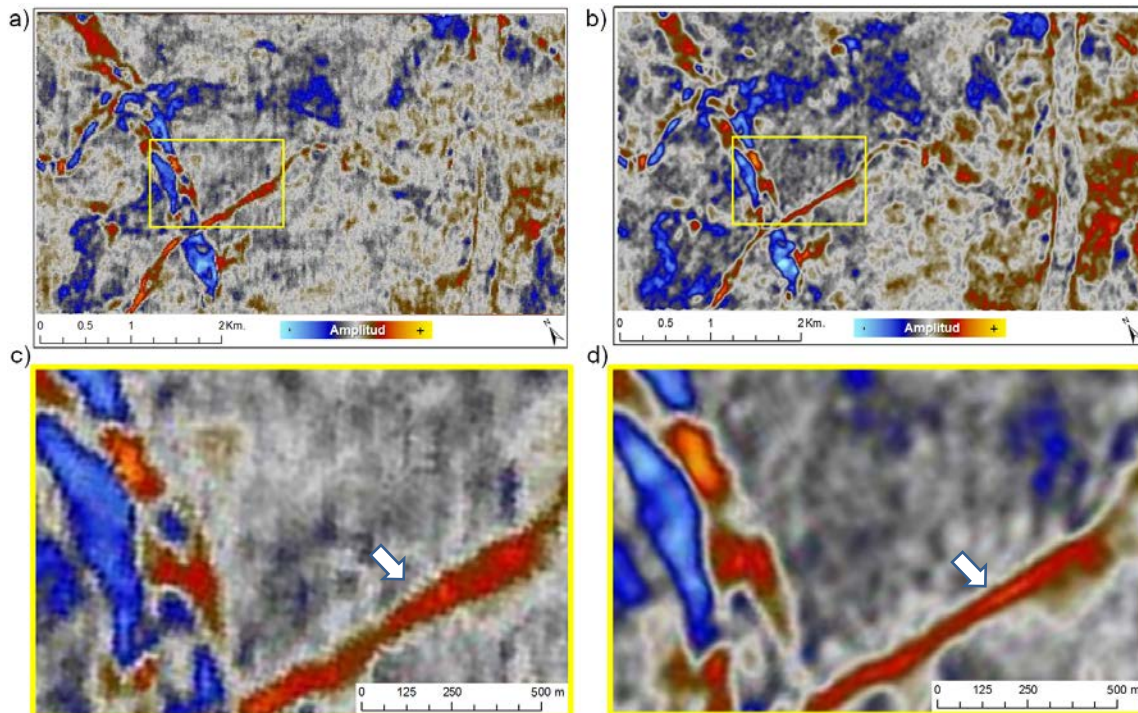
La figura 5-13b, la cual corresponde al mapa amplitudes a un tiempo 876 ms, se observa un aumento en el contraste de las amplitudes, que se identifica en la parte central superior (flecha de color blanco en la figura 5-13b) y en la esquina oeste de la figura 5-13b por los colores azules oscuros los cuales se delimitan y realzan mejor que en la figura 5-13a.

En la figura 5-13b se muestra el mapa amplitudes a un tiempo 876 ms, del cubo resultado de la inversión espectral y la interpolación, en el cual los colores azules que corresponden a bajas amplitudes, se observa el realce que genera el algoritmo de interpolación en la parte central inferior (flecha de color blanco sobre la figura 5-13b), donde los colores con amplitudes bajas se delimitan mucho mejor que en el mapa de la figura 5-13a, el cual corresponde al cubo de datos obtenidos por la inversión espectral.

Antes de calcular atributos sísmicos a los datos, se comparó el efecto de los algoritmos aplicados en los datos obtenidos contra los datos originales sin ningún tipo de mejoramiento de imagen.

Figura 5-14: Mapa de amplitudes a 864 ms, Original vs Resultado.

a) Mapa de amplitud (*time slice*) de los datos originales. b) Mapa de amplitud (*time slice*) para el cubo interpolado de la inversión espectral. b) Ampliación del cuadro amarillo de la figura 5-14a. c) Ampliación del cuadro amarillo de la figura 5-14b.



La figura 5-14a muestra un mapa de amplitudes a un tiempo 864 ms, para los datos sísmicos antes de aplicar los algoritmos propuestos en este trabajo, mientras que la figura 5-14b muestra el mismo mapa para el cubo resultado de la inversión espectral y la interpolación. Se puede observar claramente en la ampliación de la figura 5-14b (figura 5-14d) como el algoritmo de interpolación suaviza la imagen y mejora la resolución lateral.

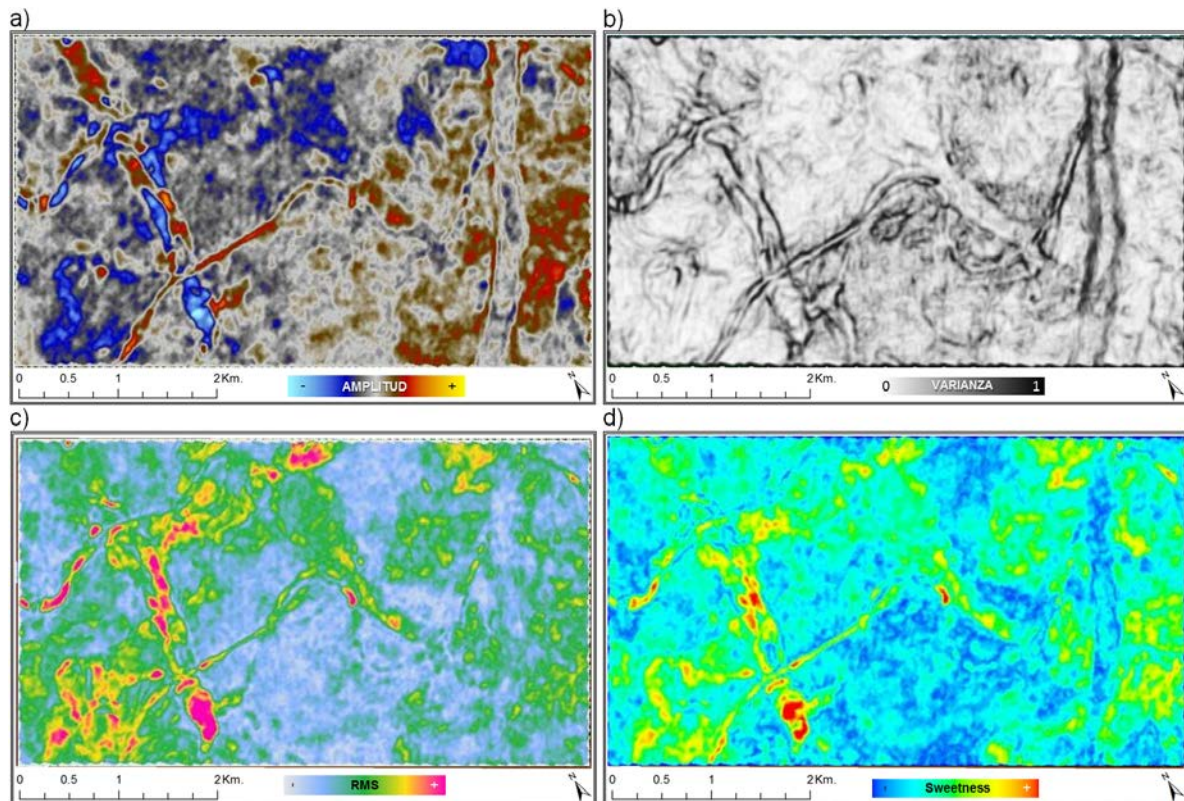
Comparando las figuras 5-14c y 5-14d, se observa que los algoritmos aplicados en este trabajo delimitan mucho mejor los estratos caracterizados con amplitudes positivas y negativas, por ejemplo lo que podría interpretarse como un canal menor a 40 m caracterizado por amplitudes positivas (flecha de color blanco sobre la figura 5-14d), se delimita mucho mejor en los datos obtenidos luego de aplicar los algoritmos propuestos en este trabajo.

5.4 Atributos sísmicos

Se hizo un aplanamiento de los cubos al tope de C3 como superficie de referencia, luego se calcularon los atributos de varianza (figura 5-15b), amplitud RMS (figura 5-15c), y Sweetness (figura 5-15d), para el cubo resultado de la interpolación aplicada a la inversión espectral. La figura 5-15a muestra el mapa de amplitudes del cubo resultado de los algoritmos aplicados en este trabajo. Se observa como cada atributo contribuye a la delimitación de estratos finos, el atributo varianza realza la parte estructural resaltando los bordes de los canales, y los atributos de amplitud RMS y Sweetness separan anomalías positivas y negativas asociadas a la litología presente en la ventana de análisis.

Figura 5-15: Mapas de los atributos para el cubo interpolado de la inversión espectral para un tiempo de 864 ms.

a) Mapa de amplitud. b) Atributo varianza. c) Atributo Amplitud RMS. d) Atributo Sweetness.



Luego de identificar la contribución que cada atributo a la interpretación de los datos, se calcularon para el cubo original y el interpolado de este, luego se generaron mapas de los atributos calculados a 902 ms, a 886 ms y a 864 ms, dentro de la ventana de

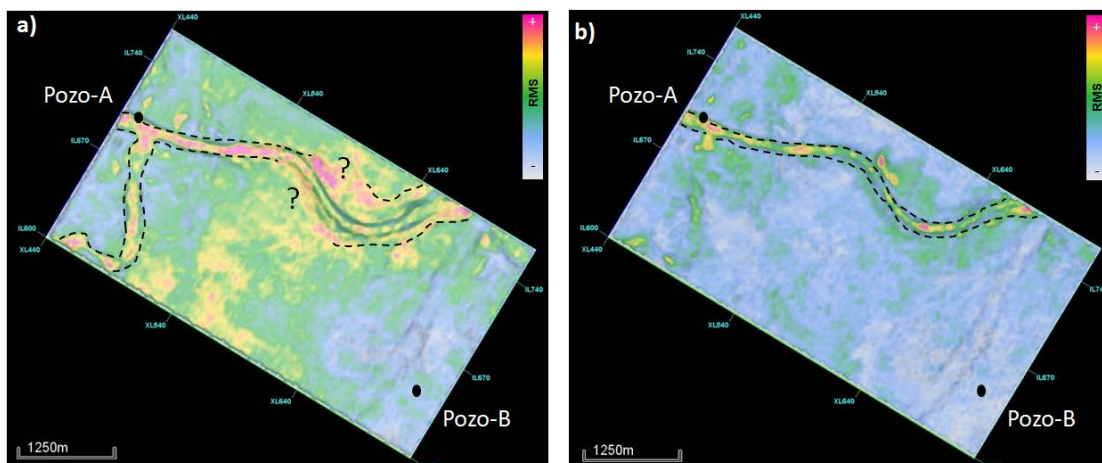
tiempo delimitada por el tope de C7 y la discordancia Pre-Cretácica para comparar las diferencias entre los datos originales y los datos obtenidos en este trabajo.

Para distinguir la litología en la ventana de tiempo de interés, se utilizó una combinación del atributo Sweetness (con 40% de transparencia) y el atributo varianza (en el fondo de la imagen), la cual es útil para identificar canales y otras características estratigráficas (Hart, B., 2008). También se utilizó la combinación amplitud RMS y varianza para comparar los resultados interpretados.

Inicialmente se calculó el atributo de Amplitud RMS con una ventana de 5 ms hacia arriba y 5 ms hacia abajo para la zona de interés comprendida entre el tope de C7 y la discordancia Pre-Cretácica, este atributo muestra la presencia de anomalías de amplitud que tienen forma de canales distributarios de geometría meandriforme en sentido Este-Oeste y otro de geometría rectilínea en sentido Norte-Sur (la figura 5-16a). Aquí se observa que los cambios litológicos no respetan la parte estructural y su delimitación es difícil de interpretar, en contraste con la figura 5-16b, la cual muestra la respuesta del atributo amplitud RMS con el atributo varianza de fondo. Para el cubo resultado de la inversión espectral e interpolación basada en lógica difusa, a un tiempo de 902 ms, también se observa como las anomalías de amplitud se pueden separar con mayor detalle, por ejemplo las anomalías positivas, las cuales se pueden asociar a arenas, se ajustan mejor a los cuerpos estructurales asociados a canales de alta energía, lo cual no ocurre en la figura 5-16a.

Figura 5-16: Mapas del atributo amplitud RMS en un tiempo de 902 ms.

a) Atributo amplitud RMS para el cubo original. b) Atributo amplitud RMS del cubo resultado de la interpolación de la inversión espectral.

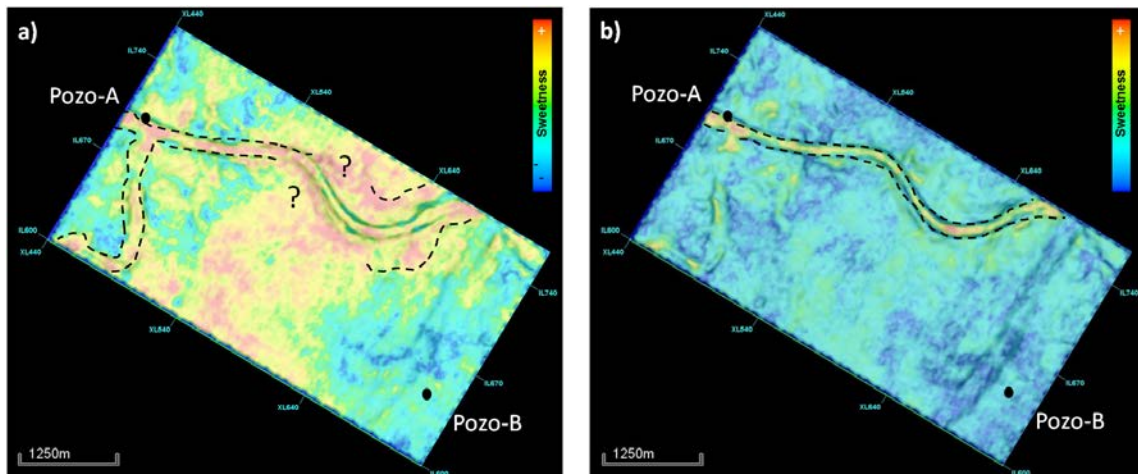


Luego de interpretar la respuesta del atributo RMS en combinación con el atributo varianza para los datos originales y los obtenidos por los algoritmos aplicados en este trabajo, se calculó el atributo “Sweetness” con una ventana de 12 ms (6ms por encima

y por debajo de cada horizonte aplanado a la superficie de referencia del tope de C3), la figura 5-17a muestra el mapa de la respuesta del atributo sweetness a un tiempo a 902 ms para los datos originales. Al compararlo con la respuesta del atributo de los datos invertidos e interpolados (figura 5-17b), se puede observar que el atributo funciona mucho mejor en los datos obtenidos de la inversión e interpolación, debido a que separa litologías interpretadas como arenas las cuales se asocian a valores de “Sweetness” positivos, de litologías con mayor contenido de lutitas asociadas a valores de “Sweetness” negativos. Cuando se compara la respuesta del atributo “Sweetness” con la respuesta del atributo de amplitud RMS, se observa que son respuestas similares debido a que son atributos que se utilizan para separar litologías e interpretar ambientes sedimentarios.

Figura 5-17: Mapas del atributo “Sweetness” para un tiempo de 902 ms.

a) Atributo “Sweetness” para el cubo original. b) Atributo “Sweetness” del cubo resultado de la interpolación de la inversión espectral.

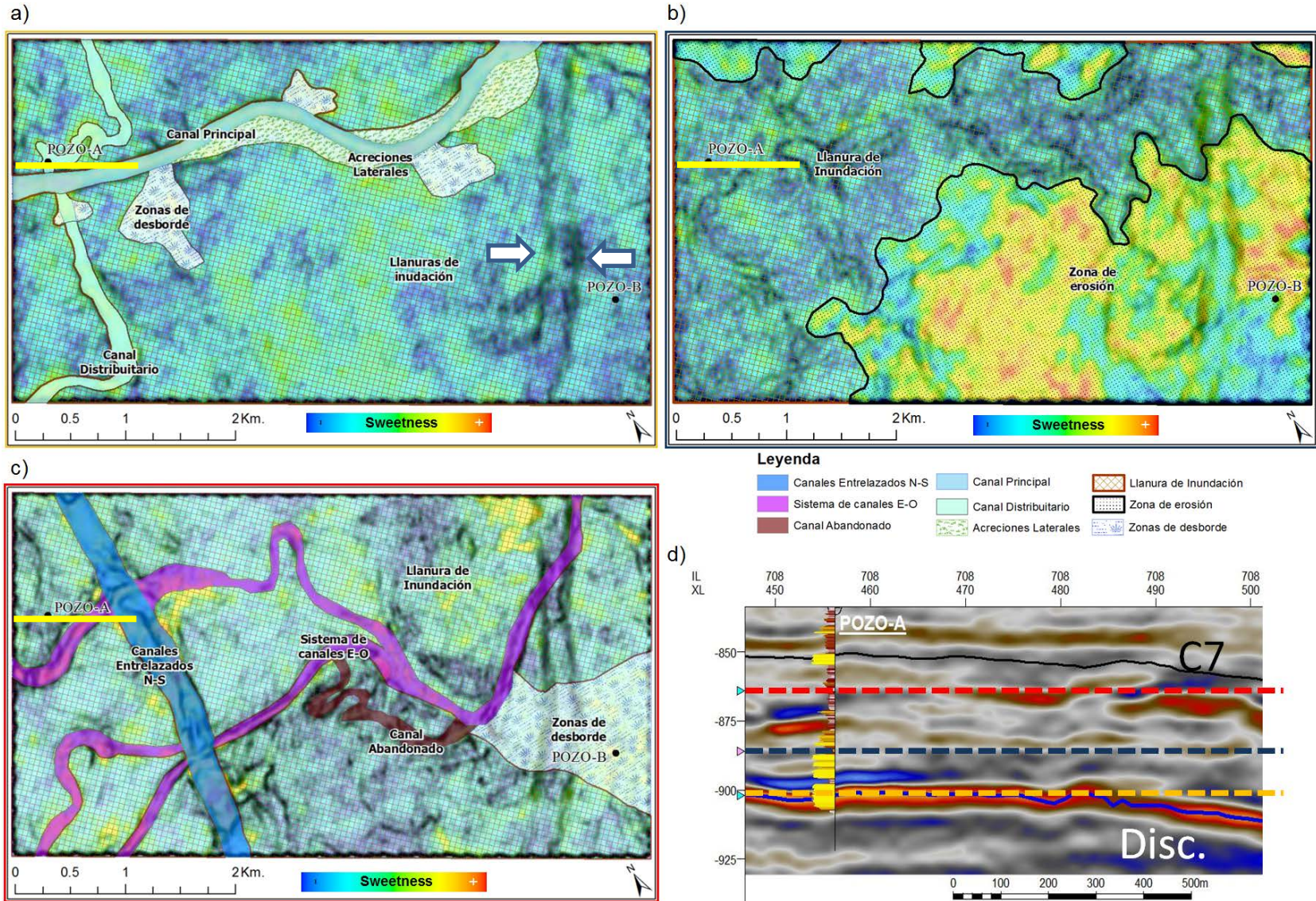


En conclusión, el atributo “Sweetness” responde mejor a los cambios litológicos en el área, delimitando mucho mejor las arenas presentes y ajustándose mejor al atributo estructural varianza, por esta razón se realizó la interpretación geomorfológica (Figura 5-18) para los mapas a 902 ms, a 886 ms y a 864 ms, utilizando la combinación de estos dos atributos.

La figura 5-18a muestra una interpretación geomorfológica para el mapa a 902 ms, donde se diferencian algunos elementos como zonas de desborde, canales principales y dos canales distributarios, en uno de los cuales se encuentra perforado el Pozo-A, y lo cual está de acuerdo a la respuesta litológica del mismo, que se encuentra en la figura 5-18d.

Figura 5-18: Interpretación geomorfológica del área.

- a) Interpretación para el mapa a 902 ms. b) Interpretación para el mapa a 886 ms. c) Interpretación para el mapa a 864 ms.
d) Ubicación de los mapas interpretados en una sección sísmica cercana al pozo-A.



Las flechas de color blanco marcan un elemento estructural que podría interpretarse como un canal de alta energía, pero este elemento se repite en los mapas de la figura 5-18b y 5-18c, lo cual indica el efecto de un canal que aparece en la misma posición en el miembro C3, por otra parte, las respuestas de los atributos estratigráficos amplitud RMS y “Sweetness” no lo diferencian como un canal del miembro C7, por lo tanto este elemento no se tuvo en cuenta en la interpretación geomorfológica del área.

Para un tiempo de 886 ms, de acuerdo al registro litológico del Pozo-A (Figura 5-18d), se puede interpretar el área como una llanura de inundación la cual se puede observar en la figura 5-25b, donde existe una zona de erosión que muestra la presencia de arenas, las cuales se pueden distinguir con los colores amarillos a rojos en el atributo “Sweetness”.

Para los ambientes cercanos al tope de C7, se interpretó el mapa a 864 ms (Figura 5-18c), en el cual se logra diferenciar dos sistemas fluviales completamente distintos, uno en color azul que se interpretó como un sistema de canales entrelazados el cual tiene dirección norte-sur, y el otro en color violeta caracterizado por tener canales delgados asociados a eventos de menor energía, con dirección este-oeste, asociado a este sistema se interpretó una zona de desborde para el pozo-B, la cual se delimitó por la presencia de arenas identificadas por el atributo “Sweetness” en esa área.

En resumen, las interpretaciones de sistemas de canales anteriormente descritas se pueden contextualizar en un marco geológico regional de la cuenca de los llanos para la formación carbonera, la cual se caracteriza por la presencia de ambientes fluviales de alta y baja energía, por lo tanto, la metodología aplicada en este trabajo proporciona información adicional que contribuye a la interpretación de estratos finos de los rasgos geológicos de interés, como canales, llanuras de inundación, canales abandonados etc.

6. Conclusiones y Recomendaciones.

El desempeño del algoritmo genético en la minimización de la función objetivo en datos reales mejora cuando la inversión se controla con algunos horizontes presentes en la ventana de análisis de la inversión, y también con la selección de los espacios de búsqueda razonables de los coeficientes de reflexión y los espesores de tiempo, la cual debe ser determinada preferiblemente con datos de pozos que se encuentren ubicados en el área de estudio.

La selección de la ondícula debe estar basada en la eficiencia que esta aporte al algoritmo en su búsqueda de la mejor solución, aunque se puede utilizar una ondícula extraída de la sísmica, se puede concluir que para los datos utilizados en este trabajo, la mejor ondícula que trabaja en el AG es una ondícula Ricker de 85 Hz.

Los resultados obtenidos de la inversión espectral resuelven la delimitación de estratos finos hasta 19.95 ft, lo cual mejora la resolución vertical de los datos originales de 24 ft. Estas diferencias se pudieron medir y observar en las imágenes comparativas entre la información de pozo y los datos sísmicos utilizados en este trabajo.

La evaluación del algoritmo de interpolación basada en lógica difusa, muestra que la diferencia entre el valor interpolado y el valor original tiene un error porcentual de máximo 20% en el rango de diferencia posible de la imagen original, en otras palabras, la imagen resultado de la interpolación predice el comportamiento del dato original en un 80%.

La interpolación basada en lógica difusa es una buena herramienta para la detección de bordes, mejorar la resolución espacial de una imagen sísmica y para aumentar el contraste de amplitudes en los mapas de amplitud (*time slices*).

El atributo varianza muestra un excelente resultado en el cubo interpolado de la inversión espectral, delimitando estructuras que pueden interpretarse como canales, las cuales en el cubo original no se delimitaban.

Se puede concluir que el atributo amplitud RMS y el atributo "Sweetness" tienen la capacidad de distinguir áreas con distinta litología, la combinación de este tipo de atributos con atributos que realzan las estructuras presentes en el área, como lo es el atributo varianza, es una buena herramienta para interpretar los ambientes sedimentarios presentes en el área de estudio.

La metodología aplicada en este trabajo generó información adicional que combinada con el uso de atributos sísmicos e información geológica del área, contribuye a la interpretación de estratos finos de los rasgos geológicos de interés, como canales, llanuras de inundación, canales abandonados etc.

El análisis que se realizó con los atributos sísmicos en los mapas para diferentes tiempos, permitió comprender los tipos de ambientes de sedimentación existentes en la ventana de interés, de este análisis se concluye que la parte basal de la ventana está influenciada por ambientes de alta energía con la presencia de canales anchos y rectilíneos, la parte media se caracteriza por una gran llanura de inundación en la cual no se observaron componentes estructurales como bordes de canales o fallas, finalmente en la parte superior de la ventana de análisis, cerca al tope de C7, se observaron sistemas de canales que en los datos sísmicos originales no se logran distinguir y en los datos obtenidos de la inversión y su posterior interpolación se logra mejorar el detalle de los elementos estratigráficos.

Una de las principales ventajas de la inversión espectral es que se puede aplicar sin información de pozos en el área de estudio, pero es recomendable utilizar información de pozos cercanos para determinar mejor los parámetros de entrada del AG.

Aunque la correlación de los datos es una buena herramienta para analizar el comportamiento de los datos es recomendable completar este análisis con conocimientos geológicos del área de estudio para proponer las reglas difusas que se usara la interpolación.

Es recomendable realizar trabajos complementarios a la inversión espectral, como una inversión elástica para comparar los resultados, caracterizar y delimitar mejor los elementos estratigráficos presentes en el área.

A. Anexo: Código en Matlab inversión espectral

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Variables Globales %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
dt = 0.002;
alphaPar = 0.5;
alphaImpar = 0.5;
tw = 200; %%% milisegundos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Variables para el GA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
nPoblacion = 100;
rcMin = -0.3;
rcMax = 0.3;
TMin = 1;
TMax = 30;
PorcenMut = 0.001;
Generaciones = 500;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

ResulInversion = struct('espT',{},'crT',{});
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% DATOS REALES SOLO CON UNA LINEA DEL CUBO %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

tempdir = 'C:\Tesis\Datos_Tesis';
filename=fullfile(tempdir,'CuboOriginal_600-1000ms.segy'); %
seismic3D=read_segy_file(filename);
selec = s_select(seismic3D,{'traces','iline_no == 708'}); %%% Selecciono mi Inline

inline = selec.headers(10:10,1);
xline = selec.headers(11:11,1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

linea = selec.traces; %Capturo mis trazas

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% CARGO LOS HORIZONTES DE CONTROL %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Los Horizontes Cargados es un archivo de excel de la forma (INLINE,XLINE,TWT)
C3 = xlsread('C3.xlsx');
C5 = xlsread('C5.xlsx');
C7 = xlsread('C7-B.xlsx');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Genero la ondicula Ricker %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Wo = GetOndicula(90,dt,64); % Funcion que devuelve una ondicula tipo Ricker (FreMax,delta tiempo, longitud)
Wavelet = [Wo';zeros(((tw/2)+1)-length(Wo),1)]; % Completo mi vector de ondicula para realizar la fft
NFFT = 2^nextpow2(((tw/2)+1));
ftW = fft(Wavelet,NFFT); %%% Realizo la transformada de Fourier para la ondicula
frecuencia = ((1/dt)/2*linspace(0,1,NFFT/2+1))'; % Vector de frecuencias

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Dentro de la linea %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ini = 1;
fin = 291; % Numero de Xline en el cubo el cual es de 291
for cont = ini:1: fin

    Traza = linea(:,cont);
    VecPosiciones = find(Traza~=0); %Vector traza sin ceros
    cr = zeros((tw/2)+1,1); %%% vector de almacenamiento de la respuesta

    if VecPosiciones ~= 0 % Verifica si hay datos en la traza ejecute el GA

        firstTime = (VecPosiciones(1)*2)-1; %Devuelve la primera pocision en tiempo de la ventana de interes en la traza

        %%% Construyo mi modelo Geologico para la Zona %%%
        s = strcat(int2str(inline),int2str(xline + cont)); %Inline y Xline
        IdHor = str2num(s);
        ModGeologico(1)= round(C3(find(C3==IdHor),2));
        ModGeologico(2)= round(C5(find(C5==IdHor),2));
        ModGeologico(3)= round(C7(find(C5==IdHor),2));

        Traza( all(~Traza,2), : ) = []; %%%traza sin zeros
    end
end

```



```

    %%% Realizo la transformada de Fourier para la traza
    SignalF = fft(Traza,NFFT);

    %%% Guardo mis datos
    save DataIn.mat alphaPar alphaImpar Traza frecuencia ftW SignalF tw dt

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% COMIENZO CON MI GA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %% Inicializo la poblacion de mi GA
    PopIni = InicializarPoblacion(nPoblacion,rcMin,rcMax,TMin,TMax,tw,Traza,firstTime,ModGeologico);
    %%% Evaluo la poblacion
    PopIni = Evaluacion(PopIni);
    n = 1;

    while n < Generaciones
        PopIni = Seleccion(PopIni); %%% Selecciono la mejor poblacion
        cross = Reproduccion(PopIni,tw); % Reproduzco la poblacion
        % Funcion que muta la poblacion de acuerdo al % de mutacion
        PopMutacion = Mutacion(PorcenMut,cross,rcMin,rcMax,TMin,TMax,tw);
        %%% Evaluo la poblacion resultante
        PopIni = Evaluacion(PopMutacion);
        %%% revisa si el criterio de parada es verdadero no continúe con las generaciones
        if criterioParada(PopIni) == 1
            n = Generaciones;
        else
            n = n + 1 % Contador de Generaciones
        end
    end

    %%% Capturo la serie de reflectividad y el espesor e tiempo producto de la minimizacion
    espTRes = PopIni(1).espT;
    crTRes = PopIni(1).crT;
    %%% Evaluo la funcion Objetivo
    Y = FuncOBJ(espTRes,crTRes);

    %%% recupero mi vector de acuerdo a la ventana de tiempo
    if sum(espTRes)<(tw+1)
        j = 1;
        k = 1;
        for i = 1:length(espTRes)
            if espTRes(i) ~= 0
                k = (k + floor(espTRes(i)/2));
                cr(k) = crTRes(i);
            end
        end
    end

    %%% Capturo los arreglos de la inversion
    ResulInversion(cont-(ini-1)).espT = espTRes;
    ResulInversion(cont-(ini-1)).crT = crTRes;

end

convT = conv(Wo,cr); %%% Hago la convolucion con el vector de reflectividad obtenido.
ArrCR(:,cont-(ini-1)) = cr;
ArrTr(:,cont-(ini-1)) = convT;

%save ResultadosPl.mat ResulInversion ArrCR ArrTr
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FUNCION OBJETIVO %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function FunObj = FuncOBJ(espT, crT)

d = load('DataIn.mat'); %%% Cargo los datos para la minimizacion

alphaPar = d.alphaPar;
alphaImpar = d.alphaImpar;

frecuencia = d.frecuencia;
ftW = d.ftW;
SignalF = d.SignalF;
dt = d.tw;
tw = d.tw;

%%% Construyo el vector de espesores y serie de reflexion para calcular la integral
if sum(espT)<(tw+1)
    NFFT = 2^nextpow2(length(SignalF));
    cr = zeros(tw+1,1);
    es = zeros(tw+1,1);
    j = 1;
    k = 1;
    for i = 1:1:length(espT)
        if espT(i) ~= 0
            k = (k + espT(i));
            es(k) = espT(i);
            cr(k) = crT(i);
        end
    end

    [crParExt,crImparExt]= DescomCoef(cr); % Funcion que descompone la serie de relectividad en su parte par e impar
    espTExt = es;

    intinfer = 1;
    intersup = length(espTExt);
    frecuencia(1) = 0.000001;

    for j = 1:(length(frecuencia)) %%% recorro mi vector de frecuencias y mi vector de tiempo tienen la misma longitud
        k = 0;
        for i = intinfer:1:intersup
            k = k + 1;
            espDecPar(k) = crParExt(i)*cos(pi*frecuencia(j)*espTExt(i));
            espDecImpar(k) = crImparExt(i)*sin(pi*frecuencia(j)*espTExt(i));
        end
        vecParIntdt(j) = Integracion(espDecPar,0,length(espDecPar),(dt));
        vecImparIntdt(j) = Integracion(espDecImpar,0,length(espDecImpar),(dt));
    end
    tpar = sum(crParExt.*espTExt);
    tImpar = sum(crImparExt.*espTExt);
    vecParIntdt = vecParIntdt';
    vecImparIntdt = vecImparIntdt';

    CrTime = complex(vecParIntdt,vecImparIntdt);

    j = 1;
    for i = (length(CrTime)-1):-1:2
        CrTimeRev(j) = CrTime(i);
        j = j + 1;
    end

    CrTimeTotal = [CrTime;CrTimeRev'];

    Rpar = real(CrTimeTotal);
    Rimpar = imag(CrTimeTotal);

    SWdiv = SignalF./ftW;

    SWdivPar = real(SWdiv);
    SWdivImpar = imag(SWdiv);

    funToIntegrateF = alphaPar*(SWdivPar-Rpar)+alphaImpar*(SWdivImpar-Rimpar);

    df = frecuencia(3)-frecuencia(2); % Delta del vector de Frecuencias
    infF = 0;
    supF = length(funToIntegrateF);

    FunObj = Integracion(funToIntegrateF,infF,supF,df); %%% Calculo la integral de las frecuencias
else
    FunObj = 100; % Controla si los parametros de ingreso a la funcion no son optimos de vuelve 100
end

```

```

##### FUNCION QUE INICIA LA POBLACION DEL ALGORITMO GENETICO
function poblacionIni = InicializarPoblacion(SizePop,LinfCR,LsupCR,LinfT,LsupT,tw,T,F,M)

Individuo = struct('espT',{},'crT',{}); % Define la estructura del Individuo

for j = 1:1:SizePop
    %Funcion que me retorna el individuo
    solucion = getIndividuoCondicionado(LinfCR,LsupCR,LinfT,LsupT,tw,T,F,M);
    Individuo(j).espT = solucion(:,1);
    Individuo(j).crT = solucion(:,2);
end
poblacionIni = Individuo;

##### FUNCION QUE CONSTRUYE LOS INDIVIDUOS PARA LA POBLACION #####

function Individuo = getIndividuoCondicionado(LinfCR,LsupCR,LinfT,LsupT,tw,Traza,firstTime,ModGeo);

Valtimel = firstTime + 600; % Primer valor en tiempo de la traza %% ej 721

ValT = (LinfT:LsupT);
n = 1; % Bandera que marca el si los espesores se pasan de la ventana de tiempo de analisis
j = 1;
Init = [];
##### Condiciono al valor de la 1ra capa Si la ventana contiene este reflector #####
dift = ModGeo(1) - Valtimel;

if (Valtimel < ModGeo(1) && dift < 15)
    Init(1,1) = randi([1 10],1,1);
else
    Init(1,1) = ValT(randi([1 length(ValT)],1,1)); % Si no colocara un coeficiente entre los parametros iniciales
end
banMod = 2;
capasFin = 0;
banC7 = 0;

while n > 0

    nextVal = ValT(randi([1 length(ValT)],1,1)); % Proximo espesor

    if (sum(Init(:,1)) + nextVal)<(tw+1) %%% Pregunta si se pasa de la ventana de tiempo la suma de espesores en tiempo
        if capasFin == 0
            if (Valtimel + (sum(Init(:,1)) + nextVal)) > ModGeo(banMod)
                valEspT = ModGeo(banMod) - (Valtimel + sum(Init(:,1))); % Se tiene en cuenta los principales reflectores
                j = j + 1;
                Init(j,1) = valEspT;
                banMod = banMod + 1;
                if banMod > length(ModGeo)
                    capasFin = 1;
                end
            else
                j = j + 1;
                Init(j,1) = nextVal;
            end
        else
            j = j + 1;
            Init(j,1) = nextVal;
        end
    else
        if ((tw+1) - sum(Init(:,1))) < 4
            n = 0;
        end
    end
end

coheRneg = (LinfCR:0.01:-0.01);
coheRpos = (0.01:0.01:LsupCR);
IniCR = [];
##### empieza en neg o pos dependiendo del valor de amplitud

if (Traza(2) < 0)
    IniCR(1,1) = coheRneg(randi([1 length(coheRneg)],1,1));
else
    IniCR(1,1) = coheRpos(randi([1 length(coheRpos)],1,1));
end

for k = 2:1:(length(Init)) % reflexion Negativa y positiva
    if mod(k,2) == 0
        IniCR(k,1) = coheRpos(randi([1 length(coheRpos)],1,1));
    else
        IniCR(k,1) = coheRneg(randi([1 length(coheRneg)],1,1));
    end
end

Individuo = [Init IniCR];

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FUNCION DE REPRODUCCION PARA EL GA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function CrossPopulation = Reproduccion(Poblacion,tw)

Individuo = struct('espT',{},'crT',{});
i = 1;
total = length(Poblacion);
Par = Parejas(0,total,total);

for j = 1:1:(total)
    madreT = Poblacion(j).espT;
    madreCr = Poblacion(j).crT;
    padreT = Poblacion(Par(j)).espT;
    padreCr = Poblacion(Par(j)).crT;

    dif = length(madreT) - length(padreT);
    if dif > 0
        SinglePointCrossover = randi([1 (length(padreT)-1)],1,1); %%%%%%%%%%% Puntos de cruce para el padre
        cruceT = [madreT(1:SinglePointCrossover);padreT(SinglePointCrossover+1:length(padreT));madreT((length(padreT)+1):length(madreT))];
        cruceCr = [madreCr(1:SinglePointCrossover);padreCr(SinglePointCrossover+1:length(padreCr));madreCr((length(padreCr)+1):length(madreCr))];
    elseif dif < 0
        SinglePointCrossover = randi([1 (length(madreT)-1)],1,1); %%%%%%%%%%% Puntos de cruce para la madre
        cruceT = [padreT(1:SinglePointCrossover);madreT(SinglePointCrossover+1:length(madreT));padreT((length(madreT)+1):length(padreT))];
        cruceCr = [padreCr(1:SinglePointCrossover);madreCr(SinglePointCrossover+1:length(madreCr));padreCr((length(madreCr)+1):length(padreCr))];
    else
        SinglePointCrossover = randi([1 (length(padreT)-1)],1,1);
        cruceT = [madreT(1:SinglePointCrossover);padreT(SinglePointCrossover+1:length(padreT))];
        cruceCr = [madreCr(1:SinglePointCrossover);padreCr(SinglePointCrossover+1:length(padreCr))];
    end

    Individuo(j).espT = cruceT;
    Individuo(j).crT = cruceCr;
end

CrossPopulation = Individuo;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Funcion de Evaluacion de la poblacion %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function EvalPopulation = Evaluacion(pop)
ValorDeseado = 0;
total = length(pop);
IndividuoEvaluado = struct('espT',{},'crT',{},'eval',{},'pos',{});

for j = 1:1:total
    IndividuoEvaluado(j).espT = pop(j).espT;
    IndividuoEvaluado(j).crT = pop(j).crT;
    IndividuoEvaluado(j).eval = abs(FuncOBJ(pop(j).espT,pop(j).crT) - ValorDeseado);
    IndividuoEvaluado(j).pos = j;
end

EvalPopulation = nestedSortStruct(IndividuoEvaluado, 'eval'); % Ordena la poblacion de acuerdo a su valor de Funcion Objetivo

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Funcion que selecciona los mejores individuos para la reproduccion %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function poblacionSel = Seleccion(poblacion)
total = length(poblacion);
for j = 1:1:(total/2) % la mitad de la poblacion que se adapta es la ganadora
    Ganadores(j) = poblacion(j);
end
% Duplico a mi poblacion Ganadora para realizar la Reproduccion o Crossover
poblacionSel = [Ganadores Ganadores];

%%% Funcion booleana que me devuelve verdadero si se cumple que el 90 de la poblacion
%%% tenga la misma solucion y que su evaluacion en la funcion objetivo sea muy cercana a cero

function Ban = criterioParada(Poblacion)

npob = length(Poblacion);
dif = Poblacion(floor((npob)-10)).eval - Poblacion(floor(1)).eval;
if (Poblacion(floor((npob)-10)).eval < 0.1) && (Poblacion(floor(1)).eval < 0.1)
    Ban = 1;
else
    Ban = 0;
end
end

```

```

%%% FUNCION QUE HACE LA INTEGRACION DE LOS VECTORES %%%%%%%%%%%

function [ val ] = Integracion(FuncionFinal, inf, sup,delta)
%Integracion Funcion que calcula por el metodo de integracion de simpson el valor de la integral
% de una funcion discreta https://es.wikipedia.org/wiki/Regla\_de\_Simpson

    val = 0;
    n = sup;
    h = (sup-inf)/n;
    if sup < 2
        val = 0;
    else
        if mod(n,2) == 0
            val = FuncionFinal(1)+FuncionFinal(n);   %%% n es par solo calcula simpson 1/3
            for i = 1:2:(n-1)
                val = val + 4*FuncionFinal(i);
            end
            for i = 1:2:(n-2)
                val = val + 2*FuncionFinal(i);
            end
            val = val * (h/3);
        else
            val = 3*h/8*(FuncionFinal(1)+3*FuncionFinal(2)+3*FuncionFinal(3)+FuncionFinal(4));
            val = val + FuncionFinal(4)+FuncionFinal(n);   %%% n es impar calcula simpson 1/3 y 3/8
            for i = 1:2:(n-5)
                val = val + 4*FuncionFinal(i+4);
            end
            for i = 1:2:(n-6)
                val = val + 2*FuncionFinal(i+4);
            end
            val = val * (h/3);
        end
    end
end

function [ CoefPar, CoefImpar ] = DescomCoef(Ro)
%DESCOMCOEF Funcion que me descompone el coeficiente de Reflexion en una
%parte par e impar
    if mod(length(Ro),2) == 0
        for i = 1:2:(length(Ro))
            CoefPar(i) = (Ro(i)+Ro(i+1))/2;
            CoefPar(i+1) = (Ro(i+1)+Ro(i))/2;
            CoefImpar(i) = (Ro(i)-Ro(i+1))/2;
            CoefImpar(i+1) = (Ro(i+1)-Ro(i))/2;
        end
        CoefPar = CoefPar';
        CoefImpar = CoefImpar';
    else
        for i = 1:2:(length(Ro)-1)
            CoefPar(i) = (Ro(i)+Ro(i+1))/2;
            CoefPar(i+1) = (Ro(i+1)+Ro(i))/2;
            CoefImpar(i) = (Ro(i)-Ro(i+1))/2;
            CoefImpar(i+1) = (Ro(i+1)-Ro(i))/2;
        end

        CoefPar = CoefPar';
        CoefImpar = CoefImpar';
        CoefPar = [CoefPar;zeros(1,1)];
        CoefImpar = [CoefImpar;zeros(1,1)];
    end
end

```



```

        ventana(3,2) = MatInterp(i+1,j);
        ventana(3,3) = MatInterp(i+1,j+2);
        MatInterp(i,j) = GetInterpolacion(ventana, Minimo, Maximo);
    end
end
end

% Tercer pixel Interpolacion con logica DIFUSA
for i = 2:1:(filFinal-1)
    for j = 2:1:(colFinal-1)
        if (MatInterp(i,j) == 1)
            ventana = zeros(3);
            ventana(1,1) = MatInterp(i-1,j-1);
            ventana(1,2) = MatInterp(i-1,j);
            ventana(1,3) = MatInterp(i-1,j+1);
            ventana(3,1) = MatInterp(i+1,j-1);
            ventana(3,2) = MatInterp(i+1,j);
            ventana(3,3) = MatInterp(i+1,j+1);
            MatInterp(i,j) = GetInterpolacion(ventana, Minimo, Maximo);
        end
    end
end

trInterpolada = [];
cont = 1;
for i = 1:1:(filFinal-1)
    for j = 1:1:(colFinal-1)
        trInterpolada(cont) = MatInterp(i,j);
        cont = cont + 1;
    end
end

TrazasInterpoladas(t,:) = trInterpolada;
t

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIN DE LA INTERPOLACION %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%% ESCRIBO LOS HEADERS %%%%

Headers = seismic3D.headers;
HeadersInter = GetHeaders(Headers,filFinal, colFinal);

seismic3D.headers = HeadersInter;
seismic3D.traces = TrazasInterpoladas;
Outfilename=fullfile(tempdir,'CuboOrig_InterpoladoFL.segy');
write_segy_file(seismic3D,Outfilename);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FUNCION QUE CONVIERTE EL ARREGLO DE TRAZAS EN UNA MATRIZ %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function GetGridInter = GetGrid(tam,VecAmp)

fil = (tam(1))*2;
col = (tam(2))*2;
ArrResul = ones([fil,col]); %Arreglo de unos para llenar

cont = 1;
for i = 1:2:fil
    for j = 1:2:col
        if (cont < length(VecAmp)+1)
            ArrResul(i,j) = VecAmp(cont);
        end
        cont = cont + 1;
    end
end
GetGridInter = ArrResul;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FUNCION QUE ME DEVUELVE EL VALOR INTERPOLADO A PARTIR DE UNA VENTANA DE 3X3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function GetValueInterpolado= GetInterpolacion(kernel, minAmp, maxAmp)

a = abs(kernel(1,1) - kernel(3,3));
b = abs(kernel(1,2) - kernel(3,2));
c = abs(kernel(1,3) - kernel(3,1));

Diferencia = abs(maxAmp - minAmp);
alpha = Diferencia*0.3; % alpha
beta = Diferencia*0.5;
lamda = Diferencia*0.7;

%%%% Identifico mi grado de Pertenencia

if (alpha > a) %% (a > 0)
    aPertenencia = 0;
elseif (alpha < a) %% (a < beta)
    aPertenencia = 1;
elseif (beta < a) %% (a < lamda)
    aPertenencia = 2;
elseif (lamda < a) %% (a < maxAmp)
    aPertenencia = 3;
else
    aPertenencia = 4;
end

if (alpha > b) %% (b > 0)
    bPertenencia = 0;
elseif (alpha < b) %% (b < beta)
    bPertenencia = 1;
elseif (beta < b) %% (b < lamda)
    bPertenencia = 2;
elseif (lamda < b) %% (b < maxAmp)
    bPertenencia = 3;
else
    bPertenencia = 4;
end

if (alpha > c) %% (c > 0)
    cPertenencia = 0;
elseif (alpha < c) %% (c < beta)
    cPertenencia = 1;
elseif (beta < c) %% (c < lamda)
    cPertenencia = 2;
elseif (lamda < c) %% (c < maxAmp)
    cPertenencia = 3;
else
    cPertenencia = 4;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% REGLAS DE INTERPOLACION %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if (aPertenencia == 0) %% (bPertenencia ~= 0) %% (cPertenencia ~= 0)   %%% Si la direccion preferencial esta en AF
    ValInterpolado = (kernel(1,1) + kernel(3,3))/2; % (A+F)/2
elseif (aPertenencia ~= 0) %% (bPertenencia ~= 0) %% (cPertenencia == 0) %%% Si la direccion preferencial esta en CD
    ValInterpolado = (kernel(1,3) + kernel(1,3))/2;
elseif (aPertenencia ~= 0) %% (bPertenencia == 0) %% (cPertenencia == 0) %%%Si en todas las direcciones es muy fuerte haga el promedio
    ValInterpolado = (kernel(1,2) + kernel(3,2)) / 2;
elseif (aPertenencia == 0) %% (bPertenencia == 0) %% (cPertenencia == 0) %%%Si en todas las direcciones es muy fuerte haga el promedio
    ValInterpolado = (kernel(1,1) + kernel(3,3) + kernel(1,2) + kernel(3,2) + kernel(1,3) + kernel(1,3)) / 6;
elseif (aPertenencia ~= 0) %% (bPertenencia == 0) %% (cPertenencia == 0) %%%Si en todas las direcciones es muy fuerte haga el promedio
    ValInterpolado = ((kernel(1,2) + kernel(3,2)) + (kernel(1,3) + kernel(1,3))) / 4;
elseif (aPertenencia == 0) %% (bPertenencia == 0) %% (cPertenencia ~= 0) %%%Si en todas las direcciones es muy fuerte haga el promedio
    ValInterpolado = (kernel(1,1) + kernel(3,3) + kernel(1,2) + kernel(3,2)) / 4;
else
    ValInterpolado = (kernel(1,1) + kernel(3,3) + kernel(1,3) + kernel(1,3)) / 4;
end

GetValueInterpolado = ValInterpolado;

% FUNCION QUE CONVIERTE LA MATRIZ INTERPOLADA A UN ARREGLO CONTINUO PARA SU POSTERIOR ESCRITURA EN UN SGY %

function ConvertTimeGrid = TimeGrid(Arr,IL,XL)
iniIL = IL(1)-1;
iniXL = XL(1)-1;
total = length(Arr);
for i = 1:1:total
    ArrResul(IL(i)-iniIL,XL(i)-iniXL)=Arr(i);
end
ConvertTimeGrid = ArrResul;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FUNCION QUE ESCRIBE HEADERS O XY EN UNA MATRIZ CONTINUA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function GetheadersMatriz = GetHeaders(mhead,Inlines, Xlines)

tam = size(mhead);
fil = (tam(1)); %%inlines resultantes
col = (tam(2))*2;
ArrResul = ones([fil,col]); %Arreglo de unos para llenar

ArrX = ones([Inlines,Xlines]);
ArrY = ones([Inlines,Xlines]);
cont = 1;
for i = 1:2:Inlines
    for j = 1:2:Xlines
        if (cont < length(mhead))
            ArrX(i,j) = mhead(6,cont);
            ArrY(i,j) = mhead(7,cont);
        end
        cont = cont + 1;
    end
end

% Interpolacion de Bordes en la primera y ultima fila
for i = 2:1:(Xlines-1)
    if (ArrX(1,i) == 1)
        ArrX(1,i) = (ArrX(1,i-1)+ArrX(1,i+1))/2;
        ArrY(1,i) = (ArrY(1,i-1)+ArrY(1,i+1))/2;
    end
    if (ArrX(Inlines,i) == 1)
        ArrX(Inlines,i) = (ArrX(Inlines,i-1)+ArrX(Inlines,i+1))/2;
        ArrY(Inlines,i) = (ArrY(Inlines,i-1)+ArrY(Inlines,i+1))/2;
    end
end

% Interpolacion de Bordes en la primera fila
for i = 2:1: (Inlines-1)
    if (ArrX(i,1) == 1)
        ArrX(i,1) = (ArrX(i-1,1)+ArrX(i+1,1))/2;
        ArrY(i,1) = (ArrY(i-1,1)+ArrY(i+1,1))/2;
    end
    if (ArrX(i,Xlines) == 1)
        ArrX(i,Xlines) = (ArrX(i-1,Xlines)+ArrX(i+1,Xlines))/2;
        ArrY(i,Xlines) = (ArrY(i-1,Xlines)+ArrY(i+1,Xlines))/2;
    end
end

for i = 1:2:Inlines
    for j = 2:1:(Xlines-1)
        %if mod(i,2) == 0 % Si es impar la fila
        if (ArrX(i,j) == 1)
            ArrX(i,j) = (ArrX(i,j-1) + ArrX(i,j+1))/2;
            ArrY(i,j) = (ArrY(i,j-1) + ArrY(i,j+1))/2;
        end
    end
end

for i = 2:2:(Inlines-1)
    for j = 2:1:Xlines
        %if mod(i,2) == 0 % Si es impar la fila
        if (ArrX(i,j) == 1)
            ArrX(i,j) = (ArrX(i-1,j) + ArrX(i+1,j))/2;
            ArrY(i,j) = (ArrY(i-1,j) + ArrY(i+1,j))/2;
        end
    end
end
end

```

```
contInline = 600;

cont = 1;

for i = 1:1:(Inlines-1)
    contXline = 440;
    for j = 1:1:(Xlines-1)
        ArrResul(1,cont) = contXline-441;
        ArrResul(2,cont) = contInline;
        ArrResul(3,cont) = contXline-441;
        ArrResul(4,cont) = contXline;
        %ArrResul(5,cont) = 1;
        ArrResul(6,cont) = ArrX(i,j);
        ArrResul(7,cont) = ArrY(i,j);
        ArrResul(8,cont) = ArrX(i,j);
        ArrResul(9,cont) = ArrY(i,j);
        ArrResul(10,cont) = contInline;
        ArrResul(11,cont) = contXline;
        %ArrResul(12,cont) = 1;
        contXline = contXline + 1;
        cont = cont + 1;
    end
    contInline = contInline + 1;
end

GetheadersMatriz = ArrResul;
```

Bibliografía

- Barreto, D. Pardo, A. Vargas, C and Martinez, J. (200t) Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology. ANH y B&M Exploration Ltda. Pág. 69-71.
- Bayona, G. Jaramillo, C. Rueda, M. Reyes-harker, A. Torres, V. (2007) Paleocene-Middle Miocene Flexural-Margin Migration Of The Nonmarine Llanos Foreland Basin Of Colombia. CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro, v. 3 (3), p. 141-160.
- Bayona, G. Valencia. A. Mora, A. Rueda, m. Ortiz, J. Montenegro, O. (2008) Estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la cuenca antepaís de los Llanos de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Geologia Colombiana No. 33 Pag 23-46.
- Bayona, G. Cortes, M. Jaramillo, C. Ojeda, G., Aristizabal, J. & Reyes-Harker, a. (2008). An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous-Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. Geological Society of America Bulletin, v. 120, p. 1171-1197.
- Bohacs, K. and Suter, J. (1997): Sequence stratigraphic distribution of coaly rocks: Fundamental controls and paralic examples. America Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 81, No. 10, p. 1612-1639.
- Brox, P Baturone, (2007) I Lógica Difusa Al Procesado De Imágenes De Video. Cnm-csic, Instituto De Microelectrónica De Sevilla. Pág. 1-4.
- Brown, A. R., (2001), Understanding Seismic Attributes. GEOPHYSICS, 66 (1), Pág 72-83.
- Brown, A. R., (2004), Interpretation of Three-dimensional Seismic Data. Sexta edition: AAPG Memoir Nro. 42.
- Casero, P. Salel, J.F. and Rossato, A. (1997): Multidisciplinary correlative evidence for polyphase geological evolution of the foot-hills of the Cordillera Oriental (Colombia). IV Simposio Bolivariano "Exploración Petrolera en la Cuencas Subandinas", T. 1, pp 119-128.
- Castagna, J. P., (2004), Spectral decomposition and high resolution reflectivity inversion: Presented at the Oklahoma Section Meeting, SEG
(wild-horse.insinc.com/cseg/castagna/)
- Castaño K. (2010). Tesis de Grado: Distribución de capas delgadas aplicando inversión espectral y atributos sísmicos. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.

- Castaño K. Ojeda G. Montes L. (2011). Optimizing thin-layer mapping through Spectral Inversion: Performance of Genetic Algorithms and Simulated Annealing. SEG Technical Program Expanded Abstracts. J. Vol. 29. p. 1610-1614.
- Castaño K. Ojeda G. (2010). Thin-layer detection using spectral inversion and a genetic algorithm. Earth Sci. Res. J. Vol. 15. p. 121-128.
- Chen, Q., and Sidney, S., 1997, Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring: The Leading Edge, v. 16, no. 5, p 445-456.
- Chopra, S. Castagna, J. P. and Portniaguine, O. (2006). Seismic resolution and thin-bed reflectivity inversion. Canadian Society of Exploration Geophysicists Recorder, Pág 19-25.
- Cooper, M. A. Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., Howe, S. Martinez, J. Naar, J. Peñas, R. Pulham, A. J. and Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 79, p. 1421-1443.
- Fajardo, A., Rojas, E., Cristancho, J, and Consorcio G&G Going System, L. (2000). Definición del Modelo estratigráfico en el intervalo Cretáceo tardío a mioceno medio en la cuenca Llanos Orientales y Piedemonte llanero. Informe final, Ecopetrol S.A. - Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).
- Guerrero J. (2004). Tesis de Grado: Caracterización De Propiedades Del Yacimiento Mediante El Análisis De Multiatributos Sísmicos En El Campo Orito. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Goldberg, D., 1989, Genetic algorithms in search for optimization and machine learning: Addison-Wesley Pub. Co.
- Hamlyn, Wes, 2014 Thin beds, tuning, and AVO. The Leading Edge, vol. 33, No. 12, Pág 1394-1396.
- Hart, B. (2008) Channel detection in 3-D seismic data using sweetness. AAPG Bulletin, V. 92, Nro. 6 pp. 733-742.
- Irving, M., (1972). Evolución estructural de los Andes, Boletín geológico INGEOMINAS, Vol. XIX, N°2, Pág 90.
- Marek Obitko, 1998. Department of Cybernetics, Faculty of Electrical Engineering. Recuperado de <http://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms>.
- Marfurt, K. J., Kirlin, R. L., Farmer S. L., and Bahorich, M. S., (1998). 3-D seismic Attributes using a semblance – based coherency algorithm: Geophysics, 63. Pág 1150-1165.

- Mitchell. M. (1998) An Introduction to Genetic Algorithms. 1st ed. Ed. MIT Press. Boston, Mass., USA. Pág. 35-81.
- Moncayo, E., Tchegliakova, N. and Montes, L. (2012). Pre-stack seismic inversion based on a genetic algorithm: A case from the Llanos Basin (Colombia) in the absence of well information. CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro, 5(1), 19-36.
- Pacific Exploration and Production (2012), Reporte de Petrofísica, Grupo de Yacimientos, Informe interno de los Pozos A y B. 22p.
- PAL, 2001. PostStack Family Reference Manual, Landmark Graphics, September, Pág. 200–332.
- Parker, Paul B. (1999). Genetic algorithms and their Use in Geophysical Problems. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Pág. 4-36.
- Partyka, G.A., Gridley, J.M., and Lopez, J. (1999), Interpretational Applications of Spectral Decomposition in Reservoir Characterization, The Leading Edge, vol. 18, No. 3, Pág 353-360.
- Pereira, L. Azevedo, R. Pinheiro, L. Abbassi, H. (2009). *Tesis de grado*: Seismic Attributes in Hydrocarbon Reservoirs Characterization. Oporto, Portugal Universidad de Aveiro Geosciences Pág. 67, 94
- Perez, R. Marfurt, K. (Noviembre 2015). Identification of brittle/ductile areas in unconventional reservoirs using seismic and microseismic data: Application to the Barnett Shale. SEG, Interpretation , Vol. 3, No.4. p. T233-T243.
- Portniaguine, O., and Castagna, J. P. (2004). Inverse spectral decomposition. 74th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts , 1786-1789.
- Puryear, C. I. (2006). Modeling and application of spectral inversion for determination of layer properties. M.S. thesis . Houston, Texas, U.S.A.: University of Houston.
- Puryear, C. I., and Castagna, J. P. (2008). Layer-thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion: Theory and application. GEOPHYSICS , 73 (2), Pág 37-48.
- Ramirez, A. Barriga, A. Baturone, I. Sanchez Solano, S. (2005). Libro Electrónico sobre Lógica Difusa. Instituto de Microelectrónica de Sevilla Cap 2 Pag. 35 - 52.
- Rietsh Erike, (2015). MathWorks SeisLab 3.02. Recuperado de:
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/53109-seislab-3-02>
- Russell B., and Hampson D., Schuelke, J., and Quirein, J., 1997. Multiattribute seismic analysis. The Leading Edge; Vol. 16, No 10, p. 1439-1443.

- Sarmiento, L. F. 2011. Geology and hydrocarbon potential Llanos basin. In: Cediél, F., and Ojeda, G. Y. (Eds.). Petroleum geology of Colombia. Volume 9: Medellin, ANH, Fondo editorial Universidad Eafit, p. 17-184.
- Souverville, S. Rosales, J. Gallegos, F. Dehesa, M. Hernández, I. Lozano, L. (2015). Fuzzy Logic Applied to Improvement of Image Resolution using Gaussian Membership Functions. National Polytechnic Institute, México. Pág. 77-88.
- Taner, M. T., Koehler, F., and Sheriff, R.E., (1979). Complex seismic trace analysis: Geophysics 44.1041 –1063.
- Taner, M. T., Schuelker, O'Doherty R., and Baysal E., (1994). Seismic Attributes revised. SEG 64th Annual International Meeting. October, Los Angeles, p. 1104-1106.
- Van Bemmél, P and Pepper, R.E.F. (2000) Seismic signal processing method and apparatus for generating a cube of Variance values. U.S. Patent Number 6, 151, 555.
- Widess, M., (1973) How thin is a thin bed? Geophysics, 38, no. 6, 1176-1180, <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440403>.
- Yilmaz, Ö. (2008) Seismic Data Analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. Tulsa Stephen M. Doherty.
- Zadeh, L. (1965) Conjuntos difusos y los sistemas: Fox J, editor. teoría del sistema . Brooklyn, NY: Universidad Politécnica Press, 1965: 29-39.
- Zeng, H. Marfurt, K. (2015). Recent progress in analysis of seismically thin beds. SEG, Interpretation, Vol. 3, No.3. p. SS15-SS22.